



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

**POSOUZENÍ VHODNOSTI OPTICKÉHO MĚŘICÍHO
PŘÍSTROJE**

CAPABILITY ASSESSMENT OF A OPTICAL MEASURING INSTRUMENT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Michal Slíž

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Róbert Jankových, CSc.

BRNO 2021

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student: **Bc. Michal Slíž**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Kvalita, spolehlivost a bezpečnost
Vedoucí práce: **doc. Ing. Róbert Jankových, CSc.**
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Posouzení vhodnosti optického měřicího přístroje

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Úkolem DP je komplexní posouzení metrologických vlastností hodnoceného měřicího přístroje.

Cíle diplomové práce:

Popis současného stavu hodnocení vhodnosti měřicích přístrojů.
Systémový rozbor řešené problematiky pro zvolený optický měřicí přístroj.
Návrh a zdůvodnění zvolených etalonů, posouzení vhodnosti měřicího systému.
Vlastní závěry a doporučení pro praxi.

Seznam doporučené literatury:

GAO, Wei, ed. Metrology. Singapore: Springer, 2019. ISBN 978-981-10-4937-8.

RABINOVICH, Semyon G. Evaluating measurement accuracy. New York: Springer, 2013. ISBN 978-1-4614-6716-8.

MONTGOMERY, Douglas C. Introduction to statistical quality control. 5th ed. Hoboken: John Wiley, 2005. ISBN 0-471-66122-8.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práca sa zaoberá posudzovaním vhodnosti optického súradnicového meracieho stroja podľa VDA 5. Posúdenie vhodnosti predstavuje efektívny nástroj pre rozhodnutie, či je hodnotený merací stroj vhodný pre zamýšľané použitie a za akých podmienok je jeho použitie možné. Teoretická časť práce je venovaná rozboru súradnicových meracích strojov, s bližším zameraním na podskupinu optických meracích strojov a analýze postupov hodnotenia ich vhodnosti. V praktickej časti práce je aplikovaný vybraný postup na konkrétnom meracom stroji Micro-Vu Sol 311. Hlavným prínosom tejto práce je popis možností posudzovaného súradnicového meracieho stroja pre jeho ďalšie používanie vo vzdelávacom procese na Fakulte strojního inženýrství VUT v Brně.

ABSTRACT

The diploma thesis deals with the capability assessment of an optical coordinate measuring machine according to VDA 5. The capability assessment is an effective tool for deciding whether the evaluated measuring machine is capable for the intended use and under which conditions its use is possible. The theoretical part of the thesis is devoted to the analysis of coordinate measuring machines, with a closer focus on a subset of optical measuring machines and the analysis of their capability assessment procedures. In the practical part of the thesis, the selected procedure is applied on the specific measuring machine Micro-Vu Sol 311. The main contribution of this thesis is a description of the possibilities of the considered coordinate measuring machine for its further use in the educational process at the Faculty of Mechanical Engineering of Brno University of Technology.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

posúdenie vhodnosti podľa VDA 5, optický merací stroj, neistota merania, chyba merania

KEYWORDS

capability assessment according to VDA 5, optical measuring machine, measurement uncertainty, measurement error

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

SLÍŽ, Michal. *Posouzení vhodnosti optického měřicího přístroje*, Brno, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 2021, 97 s., Vedúci diplomovej práce doc. Ing. Róbert Jankových, CSc.

POĎAKOVANIE

Týmto ďakujem pánovi doc. Ing. Róbertovi Jankových, CSc. za trpezlivý a ochotný prístup, cenné rady a pripomienky pri spracovávaní tejto diplomovej práce. Ďalej by som sa chcel poďakovať svojej rodine a priateľke za ich veľkú podporu, ktorú mi prejavovali počas celej doby štúdia.

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že táto práca je mojím pôvodným dielom, spracoval som ju samostatne pod vedením doc. Ing. Róberta Jankových, CSc. a s použitím literatúry uvedenej v zozname.

V Brne dňa 21.05.2021

.....

Slíž Michal

OBSAH

1	ÚVOD	15
2	MOTIVÁCIA.....	17
3	UVEDENIE DO PROBLEMATIKY	19
3.1	Legislatíva a normy	19
3.2	Terminológia.....	21
3.3	Vhodnosť meracieho stroja.....	25
3.4	Metódy hodnotenia vhodnosti meracích strojov.....	25
3.4.1	Metóda VDA 5	26
3.4.2	Metóda MSA	26
3.4.3	Vhodnosť podľa normy ČSN ISO 22514-7.....	27
3.4.4	Porovnanie a výber vhodnej metódy	27
4	SÚRADNICOVÉ MERACIE STROJE	29
4.1	Konvenčné a multisenzorové súradnicové meracie stroje.....	29
4.2	Konštrukčné typy súradnicových meracích strojov.....	30
4.3	Senzorické systémy.....	33
4.3.1	Dotykové snímacie systémy	33
4.3.2	Bezdotykové snímacie systémy.....	33
4.4	Dotykové vs. bezdotykové meracie stroje	37
4.5	Zdroje chýb a presnosť merania	38
5	VHODNOSŤ MERACIEHO STROJA PODĽA VDA 5	41
5.1	Postup stanovenia vhodnosti.....	41
5.2	Systematické odchýlky, opakovateľnosť a linearita	46
5.2.1	Systematické odchýlky merania a opakovateľnosti.....	46
5.2.2	Linearita.....	47
5.3	Nevhodné meracie systémy	48
6	MERACÍ STROJ MICRO-VU SOL 311	49
6.1	Spoločnosť Micro-Vu Corporation.....	49
6.2	CMM Micro-Vu Sol 311	50
6.2.1	InSpec Metrology Software.....	51
6.2.2	Druhy osvetlenia.....	53
7	POSTUP VYHODNOTENIA VHODNOSTI	55
7.1	Skúšobné prostriedky.....	55
7.1.1	Sklenené pravítko	55
7.1.2	Koncové mierky	57
7.1.3	Optická pomocná rovinná dosička	58
7.1.4	Postup stanovenia ukazovateľa vhodnosti.....	59
7.2	Postup merania s využitím skleneného pravítka.....	69
7.2.1	Merací program	71
7.2.2	Postup merania po jednotlivých krokoch	72
7.2.3	Analýza výsledkov merania (osi X a Y).....	74
7.3	Postup merania s využitím koncových mierok	78
7.3.1	Merací program	78
7.3.2	Postup merania v jednotlivých krokoch	80
7.3.3	Analýza výsledkov merania (osa Z)	83

7.4	Odporúčania pre ďalší rozvoj riešenej problematiky	85
8	ZÁVER.....	87
9	ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV [54]	89
10	ZOZNAM SKRATIEK, SYMBOLOV, OBRÁZKOV A TABULIEK.....	93
10.1	Zoznam tabuliek	93
10.2	Zoznam obrázkov	93
10.3	Zoznam skratiek a symbolov	94
11	ZOZNAM PRÍLOH.....	97

1 ÚVOD

Od prvých myšlienok na vytvorenie súradnicového meracieho stroja (ďalej CMM), ktorý by zefektívnil proces merania rôznych priemyselných súčiastok, prešla už dlhá doba. Neustály vývoj súradnicových techník merania, rýchlosť a presnosť výsledkov meraní, napomohli ich rozšíreniu v priemyselnej praxi. V dnešnej dobe už väčšina výrobných spoločností, od najmenších až po najväčšie nadnárodné, disponuje nejakým druhom súradnicového meracieho stroja. Vedľa konvenčných dotykových strojov sa začínajú výrazne rozširovať aj digitálne optické meracie systémy, čo je spôsobené viacerými výhodami, ktoré priniesli – vyššia rýchlosť získavania údajov, automatizovanie meracích funkcií, s tým spojená vyššia presnosť merania a v neposlednom rade absencia dotyku meradla s meraným objektom. Súbežne s vývojom a používaním týchto meracích zariadení v priemysle, rastie záujem o ich využitie aj v oblasti vedeckého výskumu či vzdelávania.[1]

Všeobecne platí, že pri akomkoľvek meraní, i na tých najmodernejších a najpresnejších meracích strojoch, budú mať výsledky merania istú variabilitu. Jedna časť tejto pozorovanej variability je inherentná meraným súčiastkam a druhá časť je naopak generovaná použitým meracím systémom. Merací systém však netvorí len samotný merací stroj, ale aj operátori, ktorí ho používajú, či podmienky alebo rôzne časové úseky, pri ktorých je stroj používaný. Okrem týchto môžu existovať aj ďalšie faktory, ktoré vplývajú na výsledok meraní, ako napríklad kalibrácia a nastavenie meracieho stroja. Analýza vhodnosti CMM, ale aj celého meracieho systému, je tak dôležitou súčasťou zlepšovania kvality produktov a dielčích procesov vo výrobe. Pre tieto účely je možné využiť niektorú z viacerých štúdií vhodnosti meracích systémov, pričom cieľom každej z nich je:

- určiť, koľko z celkovej pozorovanej variability spôsobuje merací stroj,
- izolovať zložky variability meracieho systému a definovať jednotlivé zložky neistoty merania,
- posúdiť či je merací stroj pre zamýšľané použitie vhodný, alebo nevhodný.[2]

Predložená diplomová práca je venovaná hodnoteniu vhodnosti optických súradnicových meracích strojov, ktoré predstavujú jednu z najmodernejších technológií rozmerovej kontroly. Hlavným prínosom práce sú výsledky analýzy meracích možností posudzovaného súradnicového meracieho stroja (Micro-Vu Sol 311), ktoré môžu poslúžiť ako informačný podklad pre ďalšie používanie tohto stroja vo vzdelávacom procese na Fakulte strojního inženýrství VUT v Brně.

Diplomová práca pozostáva z ôsmich kapitol a príloh.

Úvodná kapitola pojednáva o obsahu práce a druhá kapitola o podnetoch vedúcich k jej realizovaniu.

Tretia kapitola je venovaná problematike posudzovania vhodnosti meracích strojov, legislatíve a normám súvisiacich s CMM a terminológií používanej v texte celej práce.

Štvrtá kapitola obsahuje prehľad súčasného poznania v oblasti súradnicových meracích strojov, s bližším zameraním na skupinu bezdotykových – optických CMM. Piata kapitola potom pojednáva o posudzovaní ich vhodnosti podľa metodiky VDA 5.

V šiestej kapitole sú popísané základné vlastnosti meracieho stroja Micro-Vu Sol 311, ktorého vhodnosť je v práci posudzovaná a stručný prehľad informácií o softvéri, ktorý slúži k ovládaniu meracieho stroja a vyhodnocovaniu meraní na tomto stroji.

Siedma kapitola obsahuje popis meracích prostriedkov potrebných k vyhodnoteniu meracieho stroja, postup pre vytvorenie súboru nameraných dát a výpočtové modely slúžiace k posúdeniu vhodnosti z tohto dátového súboru. Okrem toho je v kapitole predstavený vyhodnocovací protokol, vytvorený s cieľom efektívnejšieho hodnotenia vhodnosti z nameraných dát a analýza výsledkov uskutočnených meraní. Na konci siedmej kapitoly sú následne sformulované odporúčania pre ďalší rozvoj riešenej problematiky.

Záverečná ôsma kapitola je potom zhrnutím celej práce.

Hlavným praktickým výstupom práce je zhodnotenie vhodnosti posudzovaného CMM Micro-Vu Sol 311 pre využitie na akademickej pôde fakulty, popis jeho možností a vytvorenie automatizovaného protokolu pre rýchle a prehľadné posudzovanie vhodnosti meracieho stroja.

2 MOTIVÁCIA

Odbor Kvalita, spoľehlivosť a bezpečnosť na Ústave výrobných strojů, systémů a robotiky FSI VUT v Brně si kladie za cieľ poskytovať študentom vedomosti a zručnosti zamerané predovšetkým na problematiku kvality, metrologie, spoľahlivosti, diagnostiky, údržby a bezpečnosti technických systémov v rôznych oblastiach priemyslu.[3]

S týmto cieľom je spojené aj neustále zlepšovanie zázemia a vybavenosti metrologických laboratórií na pôde fakulty. V roku 2020, v rámci projektu zameraného na materiálnu podporu nevyhnutnú pre skvalitnenie systému vzdelávania na VUT - Study practical with adaptive contemporary equipment (označeným skrátené ako SPACE), nadobudol Ústav výrobných strojů, systémů a robotiky FSI VUT v Brně od spoločnosti Control Check, 3D optický merací stroj amerického výrobcu Micro-Vu, model Sol 311. Tento CMM je univerzálnym meracím systémom s jednoduchým ovládaním, dlhou životnosťou a nenáročnou prevádzkou. Vďaka svojim vlastnostiam je tak nie len vhodný pre priemyselné použitie, ale aj pre používanie na akademickej pôde.[23][35]

Každý merací stroj má však svoje limity, ktorými je do určitej miery obmedzený a zároveň je nimi definovaná jeho vhodnosť pre používanie v konkrétnych prípadoch. Niektoré z nich, ako napríklad merací rozsah, či maximálna hmotnosť meraných súčiastok je bežnou informáciou od výrobcu, avšak konkrétnejšie hranice metrologickej použiteľnosti sa dajú odhaliť len pomocou uskutočňovania overovacích meraní.[6]

Podľa pokynov vedúceho práce, boli v súlade s cieľmi obsiahnutými v zadaní, konkretizované a doplnené ciele diplomovej práce takto:

1. Popis súčasného stavu súradnicových meracích strojov (CMM) s bližším zameraním na bezdotykové senzorické systémy.
2. Popis súčasného stavu hodnotenia vhodnosti CMM.
3. Podrobný systémový rozbor zvoleného postupu posúdenia vhodnosti CMM.
4. Popis základných vlastností skúmaného meracieho stroja Micro-Vu Sol 311.
5. Návrh a zdôvodnenie etalónov použitých pre hodnotenie vhodnosti CMM.
6. Posúdenie vhodnosti meracieho stroja Micro-Vu Sol 311.
7. Vytvorenie protokolu v prostredí programu MS Excel slúžiaceho pre prehľadné a efektívne vyhodnotenie vhodnosti stroja z nameraných hodnôt.
8. Formulácia zdôvodnených záverov a odporúčení pre ďalší rozvoj riešenej problematiky.

3 UVEDENIE DO PROBLEMATIKY

Systémy merania musia byť dostatočne a komplexne hodnotené, pričom je potrebné zohľadňovať rôzne vplyvy, ako napríklad neistotu pri kalibrácii etalónov, ich nadväznosti na národné a medzinárodné etalóny, alebo dlhodobú stabilitu procesu merania.[4]

Veľmi dôležité je však hodnotiť aj vhodnosť meradla, respektíve meracieho systému pre použitie k zamýšľanému účelu. K tomu slúžia rôzne metódy, ktoré sú bližšie rozobrané v nasledujúcom texte. Zároveň pri vyhodnocovaní vhodnosti je potrebné brať ohľad aj na legislatívny rámec Českej republiky a štátne i medzinárodné normy.[10] [32]

Pre jednoznačnosť textov celej diplomovej práce je v tejto kapitole uvedený prehľad používaných termínov, ktorý predstavuje doplnok k zoznamu použitých skratiek a symbolov.

V záverečnej časti tejto kapitoly je bližšie rozobraný pojem vhodnosť s cieľom jednoznačného vymedzenia, akým spôsobom bude vhodnosť v práci chápaná a tiež sú bližšie ozrejmene tri najznámejšie metódy jej hodnotenia.

3.1 Legislatíva a normy

Meracie stroje, ako aj ich harmonizácia a overovanie pred začatím uskutočňovania meraní, podliehajú viacerým legislatívnym predpisom, ale zároveň aj normám, zabezpečujúcim právnu úpravu metrológie a garanciu kvality výrobkov. Právna úprava metrológie v Českej republike sa zameriava na správnosť merania a meradiel, konkrétnejšie na oblasť meracích jednotiek, štátnych etalónov, detailne vymedzené kategórie stanovených meradiel, na certifikované a ostatné referenčné materiály, okrajovo aj na iné kategórie meradiel.[5]

Čo sa týka konkrétnych právnych predpisov pre metrológiu, tak základné z nich predstavujú:

- zákon č. 505/1990 Sb., o metrológií, v znení zákona č. 183/2017 Sb.,
- zákon č. 20/1993 Sb., o zabezpečení výkonu štátnej správy v oblasti technickej normalizácie, metrológie a štátneho skúšobníctva,
- zákon č. 22/1997 Sb., o technických požiadavkách na výrobky, v znení neskorších predpisov, a o zmene a doplnení niektorých zákonov, v znení zákona č. 91/2016 Sb.,
- vyhláška MPO č. 262/2000 Sb., v znení vyhlášky MPO č. 125/2015 Sb., ktorou sa zaisťuje jednotnosť a správnosť meradiel a meraní,
- vyhláška MPO č. 264/2000 Sb., v znení vyhlášky MPO č. 424/2009 Sb., o základných meracích jednotkách a ostatných jednotkách a o ich označovaní,
- vyhláška MPO č. 345/2002 Sb., v znení vyhlášky MPO č. 120/2015 Sb., ktorou sa stanovujú meradlá k povinnému overovaniu a meradlá podliehajúce schváleniu typu,
- nariadenie vlády č.120/2016 Sb., o posudzovaní zhody meradiel pri ich dodávaní na trh; toto nariadenie nahradilo pôvodné nariadenie vlády č. 464/2005 Sb., ktorým sa stanovovali technické požiadavky na meradlá, novelizované nariadením vlády č.246/2010 Sb.[5][6]

S ohľadom na to, že Česká republika je členským štátom EÚ, sú základom pre harmonizáciu meradiel podliehajúcich metrologickej kontrole a požiadaviek na meradlá:

- smernica Európskeho parlamentu a Rady 2009/34/ES o spoločných ustanoveniach pre meradlá a metódy metrologickej kontroly,
- smernica Európskej komisie č. 2009/137/ES o meradlách,
- smernica Európskeho parlamentu a Rady 2004/22/ES o meracích prístrojoch (MID), v znení smernice Rady 2006/96/ES, ktorá nahrádza národné predpisy členských štátov EÚ a ktorej cieľom je harmonizácia požiadaviek na nové meradlá umiestňované na trh alebo uvádzané do prevádzky v EÚ.[5]

Platí, že meradlá, ktoré získajú EHS schválenie typu a prvotné EHS overenie, môžu byť uvedené na trh a užívané vo všetkých členských štátoch EÚ bez ďalších skúšok, či schválenia typu.[5]

Pre zabezpečovanie kvality vo výrobe, službách, ale aj štátnej správe platia normy ČSN EN ISO rady 9000:

- ČSN EN ISO 9000 – Systémy managementu kvality – Základné princípy a slovník, popisuje základy a zásady systémov managementu akosti a špecifikuje terminológiu systémov managementu akosti, respektíve kvality v znení prekladu z roku 2016,
- ČSN EN ISO 9001 – Systémy managementu kvality – Požiadavky, označovaná ako kritériálna norma, ktorej požiadavky na QMS musí organizácia splniť, v prípade, že chce preukázať korektné fungovanie QMS a tým jej schopnosť poskytovať produkty spĺňajúce požiadavky zákazníka a príslušné predpisy a jej úmysel zvyšovať spokojnosť zákazníkov,
- ČSN EN ISO 9004 – Management kvality – Kvalita organizácie – Návod k dosiahnutiu udržateľného úspechu, poskytuje organizáciám návod na dosiahnutie udržateľného úspechu, pričom sa zameriava na poskytovanie dôvery v schopnosť organizácie dosiahnuť udržateľný úspech.[6]

Konkrétnejšie sa priamo merania a meracích strojov dotýkajú napríklad normy:

- ČSN EN ISO 10012 – Systémy managementu merania – Požiadavky na procesy merania a meracie vybavenie,
- ČSN EN ISO/IEC 17025 – Všeobecné požiadavky na kompetenciu skúšobných a kalibračných laboratórií,
- ČSN EN ISO/IEC 17043 – Posúdenie zhody – Všeobecné požiadavky na skúšanie spôsobilosti,
- ČSN ISO 22514-7 – Štatistické metódy v managementu procesu – Spôsobilosť a výkonnosť – Časť 7: Spôsobilosť procesov merania,
- ČSN P ENV 13005, harmonizovaná norma DIN V ENV 13005 – Pokyn pre vyjadrenie neistoty merania (GUM), platná však len do 02/2019, kedy bola zrušená bez náhrady,
- ČSN EN ISO 14253-1, harmonizovaná norma DIN EN ISO 14253 – Geometrické špecifikácie produktu (GPS) – Skúška obrobkov a meradiel meraním – Časť 1: Pravidlá rozhodovania pre preukázanie zhody alebo nezhody so špecifikáciami – s účinnosťou od mesiaca júl, roku 2018,
- ČSN EN ISO 14253-2, harmonizovaná norma DIN EN ISO 14253 – Geometrické špecifikácie produktu (GPS) – Skúška obrobkov a meradiel meraním – Časť 2: Návod

pre odhad neistoty merania v GPS, pri kalibrácii meracieho vybavenia a pri overovaní výrobku,

- ČSN EN ISO 10360 – Preberacie a periodické skúšky súradnicových meracích strojov (CMM).[17][24]

Ďalším informačným zdrojom pre hodnotenie, respektíve kalibráciu meracích zariadení môžu byť americké normy:

- ANSI/NCSL Z540.1-1994 (R2002) – Kalibračné laboratóriá a meracie a skúšobné zariadenia – všeobecné požiadavky,
- ANSI/NCSL Z540.3-2006 – Požiadavky na kalibráciu meracích a skúšobných zariadení.[25]

Tieto normy, však stále ako aktívne, boli nahradené medzinárodnou normou ISO/IEC 17025, ako jej časti 1 a 2.[26]

3.2 Terminológia

Pre účely objasnenia pojmov používaných v tejto diplomovej práci je uvedený ich nasledujúci prehľad. Jednotlivé definície a vysvetlenia pojmov vychádzajú zo štyroch základných dokumentov a sice príručiek metodík MSA a VDA 5, Medzinárodného slovníku základných a všeobecných termínov v metrológii (ďalej len VIM) a Pokynu pre vyjadrovanie neistoty meraní (ďalej len GUM), ale konkrétne znenia v tejto práci sú upravené v dôsledku prekladu do slovenského jazyka.[4][7][8][9][27]

Vzhľadom k tomu, že u pojmov meranie a neistota merania dochádza naprieč jednotlivými dokumentami k rozdielom v definíciách, sú pre porovnanie v tejto práci uvedené na jednom mieste spolu. Ďalší text sa však významovo odvoláva len na definíciu uvedenú vo VIM.[27]

S ohľadom na zásadnosť pojmu vhodnosť meracieho stroja pre túto prácu, je tento pojem charakterizovaný v samostatnej podkapitole.

ANOVA

Metóda matematickej štatistiky, analýza rozptylu, pomocou ktorej je možné uskutočniť odhad štandardných neistôt.[4]

Bilancia neistôt

Tabuľka zhrňujúca výsledky odhadov, respektíve štatistických analýz zložiek neistôt, ktoré prispievajú k neistote výsledku merania. Táto neistota výsledku je jednoznačná len do takej miery, ako je definovaný samotný proces merania.[4]

Drift meradla

Vyjadruje celkovú variabilitu výsledkov meraní v dostatočne dlhom čase, čiže zmenu strannosti v čase. Spôsobený býva systematickým vplyvom tzv. nezávládnutého zdroja, ktorým môže byť starnutie alebo opotrebovanie meradla.[4]

Etalón

Definuje sa ako realizácia definície veličiny s udanou hodnotou a pridruženou neistotou merania, ktorá je použitá ako referencia.[4]

Justovanie meracieho systému

Súbor činností uskutočňovaných na meracom systéme tak, aby poskytoval predpísané indikácie zodpovedajúce daným hodnotám veličiny, ktorá má byť meraná.[27]

Kalibrácia

Činnosť, ktorá pri špecifických podmienkach stanoví vzťah medzi hodnotami veličiny s neistotami merania poskytnutými etalónmi a odpovedajúcimi indikáciami s pridruženými neistotami merania a následne tieto informácie použije pre stanovenie vzťahu pre získanie výsledku merania z indikácie.[4]

Koeficient rozšírenia

Číselná hodnota koeficientu (činiteľa), používaná ako násobok kombinovanej štandardnej neistoty s cieľom získať rozšírenú neistotu. Tento koeficient býva väčší ako 1, obvykle však číslo v rozsahu od 2 do 3.[8]

Kombinovaná štandardná neistota

Štandardná neistota výsledku merania, ak je výsledok získaný z hodnôt niekoľkých ďalších veličín a rovná sa kladnej hodnote druhej odmocniny súčtu výrazov - rozptylov alebo kovariancií týchto ďalších veličín.[4]

Linearita meracieho systému

Označenie závislosti zmeny strannosti na veľkosti alebo rozsahu meraných dát.[4]

Meradlo

Zariadenie, ktoré sa používa na uskutočnenie merania, a to buď samostatne alebo v spojení s ďalšími doplnkovými zariadeniami.[4]

Meracie zariadenie

Môže ním byť merací stroj, softvér, etalón, referenčný materiál alebo pomocný prístroj, či ich kombinácia, ktoré sú potrebné na realizáciu procesu merania.[4]

Merací systém

Kombinácia meradiel a často aj iných prístrojov, potrebných čidiel a obslužných zariadení, ktorá je usporiadaná a prispôbená tak, aby poskytovala informácie používané ku generovaniu nameraných hodnôt veličiny v špecifikovaných intervaloch pre veličiny špecifikovaných druhov.[7]

Meraná veličina

Veličina, ktorá má byť meraná, respektíve je predmetom merania.[7]

Meranie

Podľa MSA definované ako priradenie čísel (alebo hodnôt) hmotným veciam tak, aby reprezentovali ich vzájomné vzťahy s ohľadom ku konkrétnym vlastnostiam. Túto definíciu uviedol prvýkrát Churchill Eisenhart v roku 1963.[9]

Podľa VIM definované ako proces experimentálneho získania jednej alebo viacerých hodnôt veličiny, ktoré je možné veličine zmysluplne priradiť.[7]

Podľa VDA 5 označené tiež **kontrola meraním** je definované ako stanovenie špecifickej hodnoty meranej premennej ako násobok alebo podiel jednotky alebo dohodnutého referenčného systému. Pri meraní sa vykonáva kvantitatívne porovnanie meranej premennej s referenčnou veličinou, a to pomocou meradla respektíve meracieho zariadenia.[4]

Metóda hodnotenia neistoty spôsobom A

Metóda hodnotenia neistoty pomocou štatistickej analýzy série pozorovaní.[8]

Metóda hodnotenia neistoty spôsobom B

Metóda hodnotenia neistoty pomocou iných spôsobov než je štatistická analýza radu pozorovaní, napríklad z údajov od výrobcu, kalibračných listov, skúseností alebo všeobecných znalostí o správaní a vlastnostiach materiálov a meradiel, prípadne informácií z predošlých meraní.[4]

Metóda merania

Nazývaná aj meracia metóda je generickým popisom logického organizovania činností použitých pri meraní.[7]

Metrologická (meracia) nadväznosť

Vlastnosť výsledku merania, pomocou ktorej môže byť výsledok vzťahnutý k referencií cez dokumentovaný reťazec kalibrácií, pričom každý z nich má svoj podiel na neistote merania.[4]

Nameraná hodnota veličiny

Hodnota veličiny reprezentujúca výsledok merania.[4]

Neistota merania

Podľa VIM je nezáporný parameter charakterizujúci rozptýlenie hodnôt veličiny, priradený k meranej veličine na základe použitých informácií. Všeobecne sa pre daný súbor informácií predpokladá, že neistota merania je pridružená ku stanovenej hodnote veličiny priradenej k meranej veličine.[7]

Podľa GUM je parametrom spojeným s výsledkom merania, ktorý charakterizuje rozptyl hodnôt, ktoré môžu byť odôvodnene priradené meranej veličine. Týmto parametrom môže byť napríklad smerodajná odchýlka alebo jej násobok, či polovičná šírka intervalu, ktorá má stanovenú konfidenčnú (dôveryhodnostnú) úroveň.[8]

Opakovateľnosť merania

Precíznosť merania podliehajúca súboru podmienok opakovateľnosti merania, ktorý zahŕňa rovnaký postup merania, obslužný personál, merací systém, pracovné podmienky, miesto vykonania merania a zopakovanie merania na rovnakom objekte alebo podobných objektoch v krátkom časovom úseku.[4]

Overovanie

Poskytnutie objektívneho dôkazu o tom, že daná položka (objekt) spĺňa špecifikované požiadavky. Môže sa jednať napríklad o potvrdenie o dosiahnutí funkčných vlastností alebo zákonných požiadaviek na merací systém.[4]

Postup merania

Vo VIM definovaný ako podrobný popis merania podľa jedného alebo viacerých meracích princípov a danej metódy merania, založený na modely merania a zahrňujúci akýkoľvek výpočet k získaniu výsledku merania.[7]

Pracovný etalón

Nazývaný tiež nastavovací etalón, alebo referenčný diel je taký etalón, ktorý sa bežne používa na kalibráciu alebo verifikáciu meradiel, či meracích systémov.[4]

Pravá hodnota veličiny alebo skutočná hodnota

Hodnota veličiny, ktorá je v zhode s definíciou veličiny.[4]

Presnosť merania

Blížkosť zhody medzi nameranou hodnotou veličiny a pravou hodnotou veličiny meranej veličiny.[8]

Proces merania

Predstavuje kombináciu vzájomne previazaných zdrojov, aktivít a vplyvov, ktoré vytvárajú meranie, pričom tieto zdroje môžu byť ľudskej alebo materiálnej povahy.[4]

Reprodukovateľnosť

Označuje variabilitu medzi operátormi. Popisuje teda variabilitu priemeru nameraných hodnôt jednotlivých operátorov, ktoré namerali použitím rovnakého meracieho stroja, pri meraní konkrétnej charakteristiky na jednom výrobku.[10]

Rozlíšenie

Najmenšia zmena meranej veličiny, ktorá spôsobí rozoznateľnú zmenu v odpovedajúcej indikácii.[4]

Rozšírená neistota

Veličina stanovujúca interval okolo výsledku merania, ktorý dovoľuje očakávať pokrytie veľkého podielu rozdelení hodnôt, ktoré môžu byť odôvodnene priradené meranej veličine.[8]

Stabilita meradla

Označovaná tiež ako stálosť je vlastnosťou meradla, ktorá určuje, či jeho metrologické vlastnosti zostávajú konštantné v čase.[7]

Stelesnená miera

Meradlo, ktoré reprodukuje, alebo trvalo poskytuje behom jeho používania, veličiny jedného alebo viacerých druhov, pričom každá z týchto veličín má pridelenú hodnotu veličiny. Stelesnená miera môže byť napríklad etalón (štandard), etalónové závažie, dĺžkové meradlo, či certifikovaný referenčný materiál.[7]

Štandardná neistota

Neistota výsledku merania vyjadrená ako smerodajná odchýlka.[4]

Vychýlenie (strannosť) / Bi (Bias)

Predstavuje odhad, respektíve mieru systematickej chyby merania.[4]

Jedná sa teda o rozdiel medzi strednou hodnotou výsledkov skúšok (meraní) a prijatou referenčnou hodnotou.[11]

Výsledok merania

Súbor hodnôt veličiny, priradenej meranej veličine spoločne s akoukoľvek ďalšou dostupnou relevantnou informáciou.[7]

3.3 Vhodnosť meracieho stroja

Vo všeobecnosti je možné pod pojmom vhodnosť chápať ukazovateľ určujúci, či je daný merací systém vhodný pre konkrétnu zamýšľanú aplikáciu. Konkrétnejšie definície tohto pojmu sú uvedené predovšetkým vo dvoch príručkách metód, respektíve metodík analýz vhodnosti meracích systémov. Jedná sa o už vyššie spomínané metodiky VDA 5 a MSA, ktoré sú bližšie rozobrané v ďalšej časti tejto práce.[4][9]

V prípade definície podľa metodiky VDA 5 je potrebné uviesť, že pôvodný preklad do českého jazyka prekladal pojem „Eignung“ ako „Způsobilost“, avšak autor prekladu druhého vydania pán doc. Dr. Ing. Pavel Němeček, zvolil pre svoj preklad tohto pojmu český termín „Vhodnost“. Pretože je možné súhlasiť s jeho dôvodmi pre použité českého termínu „Vhodnost“ (predovšetkým jeho domnienku o presnejšej významovej zhode, ktorú zastávajú aj jeho kolegovia a kolegyne, považovaní za autority v oblasti metrologie), je aj v nasledujúcom texte, pokiaľ sa bude odvolávať na VDA 5, používaný preklad pôvodného nemeckého pojmu „Eignung“, alebo tiež v anglickom preklade VDA 5 - „Capability“, ako vhodnosť, napriek tomu, že rovnakým slovom, býva v angličtine mienený i pojem spôsobilosť.[4]

Zo samotnej definície uvedenej vo VDA 5 vyplýva, že vhodnosťou meracieho systému a teda aj meracieho stroja, je jeho kvalifikácia pre konkrétnu úlohu v kontrolnom (meracom) procese s výhradným prihliadnutím na požiadavky presnosti merania (neistotu merania). Neistota merania, je preto základom pre výpočet vhodnosti a je zohľadňovaná pri následnom preukazovaní zhody so špecifikovanými požiadavkami.[4]

Druhá metodika – MSA, vhodnosť meracieho systému definuje ako odhad kombinácie odchýlok merania (náhodných a systematických) na základe krátkodobého posudzovania, pričom obsahuje charakteristiky systému popisujúce variabilitu polohy nameraných dát a variabilitu šírky procesu v závislosti na meracom systéme.[9]

3.4 Metódy hodnotenia vhodnosti meracích strojov

Meracie stroje, respektíve celé meracie systémy sú kľúčovou súčasťou systému riadenia kvality v súčasnej priemyselnej praxi. Zvolením vhodného meracieho systému sa predchádza degradovaniu zbieraných dát o výrobe a znižuje sa riziko neskorého rozpoznania poklesu spôsobilosti výrobných procesov, a teda aj kvality výroby. [10]

Hodnotenie vhodnosti preto predstavuje jeden z hlavných nástrojov používaných v súčasnosti k zaisťovaniu očakávanej vysokej kvality produkcie. Spôsob, na základe ktorého sa posudzuje vhodnosť nasadenia skúmaného meracieho stroja pre konkrétnu aplikáciu, je založený na skúmaní nameraných hodnôt, pričom sa posudzuje rozlíšenie, presnosť merania a v prípade posudzovania celého meracieho procesu aj vplyv obsluhy a celková neistota merania.[10]

Pri tomto hodnotení sa najčastejšie vychádza z dvoch metodických príručiek, konkrétne VDA 5 a MSA. Ďalšou možnosťou je potom hodnotenie podľa postupu popísaného v norme ČSN ISO 22514-7.[4][9][28]

3.4.1 Metóda VDA 5

Táto metóda hodnotenia vhodnosti je popísaná v pôvodne nemeckej metodickej príručke VDA 5, vydanéj Združením automobilového priemyslu (nemecky – Verband der Automobilindustrie). Jedná sa o jednu z viacerých príručiek, ktorú vydala táto inštitúcia, pričom práve táto sa zaoberá vhodnosťou meracích systémov (Eignung von Messsystemen), ale aj vhodnosťou procesov merania a kontroly (Eignung von Mess- und Prüfprozessen). Vhodnosť vyšetruje v prípade, keď je pre meraný znak, respektíve charakteristickú vlastnosť, predpísaná tolerancia. Od tolerancie výrobného procesu je následne odvodená aj podmienka rozlíšenia alebo tiež citlivosti meracieho systému.[4]

Základom vyhodnocovania vhodnosti podľa metódy VDA 5 je vyšetrovanie neistôt. Metóda je rozdelená do dvoch častí, a síce vhodnosť meracieho systému a vhodnosť procesu merania. V prípade vhodnosti meracieho systému sa berú do úvahy neistoty priamo súvisiace so samotným meracím systémom, čo je napríklad neistota kalibrácie, či opakovateľnosti etalónu. U vhodnosti celého procesu merania sa ďalej počíta aj s opakovateľnosťou operátorov, vplyvmi teploty, či reprodukovateľnosťou meracieho prípravku. Stanovenie neistôt merania vychádza z Pokynu pre vyjadrovanie neistôt merania (GUM). Z takto stanovených neistôt meraní sa následne určia ukazovatele vhodnosti a k nim limitné hodnoty, pri ktorých prekročení je merací systém alebo proces vyhodnotený ako nevhodný.[4][10]

Je dôležité poznamenať, že príručka a teda aj samotná metóda hodnotenia VDA 5 sa vzťahuje predovšetkým na skúmanie geometrických parametrov, a preto je potrebné jej použitie, v prípade skúmania iných fyzikálnych meraní, konkrétne posúdiť.[4]

3.4.2 Metóda MSA

Metóda hodnotenia vhodnosti meracieho systému MSA je popísaná v rovnomennej príručke MSA. Jedná sa o príručku vypracovanú pracovnou skupinou pre analýzu systémov merania a schválenú pracovným tímom pre stanovenie požiadaviek na kvalitu dodávateľov spoločností Chrysler Group LLC, Ford Motor Comp. a General Motors Corp., pod patronátom Akčnej skupiny pre automobilový priemysel AIAG. Účelom príručky je poskytnúť smernice pre posudzovanie kvality systémov merania, predovšetkým tých, ktoré sú používané v priemysle.[9][10]

V rámci tejto metódy sa skúma niekoľko základných charakteristík meracieho systému. Jedná sa v prvom rade, rovnako ako v prípade VDA 5, o citlivosť meracieho systému, ktorú v MSA predstavuje prah citlivosti meradla. Ním sa označuje veľkosť zmeny vzhľadom k referenčnej hodnote, ktorú je meradlo schopné rozpoznať. Jedná sa teda o hodnotu najmenšieho dieliku na stupnici meradla, pričom MSA pripúšťa, v prípade hrubej stupnice, delenie dielikov na polovicu. Avšak prah citlivosti by mal predstavovať minimálne jednu desatinu pozorovanej variability procesu.[10]

Ďalšími skúmanými charakteristikami sú tie, ktoré popisujú variabilitu polohy nameraných dát a variabilitu šírky procesu v závislosti na meracom systéme. V prípade variability polohy sa jedná o vychýlenie (strannosť), stabilitu (drift) a linearitu systému. Charakteristiky popisujúce variabilitu šírky sú tzv. indexy GRR (alebo tiež R&R, odhad variability opakovateľnosti a reprodukovateľnosti meracieho systému). Na základe týchto indexov, respektíve charakteristiky GRR (vyjadrenej v %GRR vzhľadom k tolerancii výrobku alebo vzhľadom k premenlivosti procesu, t.j. variabilite výrobku) sa vyhodnocuje vhodnosť meracieho systému, avšak toto vyhodnotenie má zmysel vykonávať iba v prípade, že podmienky pri meraní sú stabilizované. Merací systém je potom buď všeobecne prijateľný

(%GRR < 10%), vhodný, alebo tiež spôsobilý s výhradou (%GRR = 10% ~ 30%), t.j. akceptovateľný len pre niektoré aplikácie a neprijateľný (%GRR > 30%). Okrem hodnotenia podľa charakteristík GRR by však pre konečné rozhodnutie a vhodnosti meracieho systému malo byť použité aj ďalšie kritérium, napríklad počet odlišných kategórií.[9][10]

3.4.3 Vhodnosť podľa normy ČSN ISO 22514-7

Harmonizovaná medzinárodná norma ČSN ISO 22514 Statistické metódy v managementu procesu – Způsobilost a výkonnost, sa tiež zaoberá posudzovaním vhodnosti meracích systémov, predovšetkým však v časti 7: Způsobilost procesů měření.[28]

Za účelom posudzovania vhodnosti používa obdobnú filozofiu hodnotenia, aká je použitá aj v metóde VDA. Norma popisuje postup pre validáciu meracích systémov i procesov merania pre zamýšľané meracie úlohy pomocou zistenia zložiek neistôt merania a stanovenia odporúčanými preberacími kritériami – ukazovateľa spôsobilosti meracieho systému C_{MS} a spôsobilosti procesu merania C_{MP} a/alebo recipročnej hodnoty ukazovateľa vhodnosti meracieho procesu Q_{MP} a meracieho systému Q_{MS} . [12]

Rovnako, ako aj v metodologickej príručke VDA 5, je aj v tejto norme obsiahnutý výber základných príkladov výpočtov pre stanovenie parametrov, na základe ktorých je posudzovaná vhodnosť MS.[12]

V porovnaní s metódami VDA 5 a MSA má norma ČSN ISO 22514-7 výhodu v priamej nadväznosti na ďalšie medzinárodné normy ISO, naopak jej nevýhodou je, že sa v rámci posudzovania zameriava iba na odhad vhodnosti meracieho systému. Predstavuje veľmi zjednodušenú metódu, a preto je posudzovanie s jej využitím možné len v prípadoch, keď sú neistoty vznikajúce z použitých metód meraní a špecifikácií zanedbateľné.[12]

3.4.4 Porovnanie a výber vhodnej metódy

Metóda hodnotenia vhodnosti meracieho systému MSA síce obsahuje popis hodnotenia samotného meracieho zariadenia a jeho vplyvu na celkovú chybu pri meraní, ale hodnotí predovšetkým merací systém, na ktorý nahliada ako na celok, ktorému stanovuje chybu. V porovnaní s metódou VDA 5 a normou ČSN ISO 22514-7 je jednoduchšia, pretože namiesto zdĺhavého a podrobného určovanie jednotlivých zložiek neistoty merania, využíva jeden experiment za účelom stanovenia %GRR, na základe ktorého už priamo stanovuje vhodnosť meracieho procesu. Nevýhoda takéhoto zjednodušeného postupu spočíva v nedostatočnej identifikácii a následnej možnosti odstránenia negatívnych vplyvov na merací systém, v prípade, že je identifikovaný ako nevhodný.[12] [28]

Metóda hodnotenia vhodnosti metódou VDA 5 spočíva v podrobnom, ale časovo náročnom vyhľadávaní a kvantifikácii jednotlivých zložiek neistoty merania. Jeho výhoda v porovnaní s metódou MSA sa ukazuje práve u meracích systémov a procesov merania vyhodnotených ako nevhodných, kedy napomáha rýchlemu a jednoduchému odhaleniu tých zložiek neistoty merania, ktoré majú prevažujúci negatívny vplyv na výsledky. Za ďalšiu jej výhodu oproti metóde MSA môže byť považované to, že vychádza predovšetkým z medzinárodných noriem ISO, ktoré sú akceptované vo väčšine krajín sveta.[12]

Norma ČSN ISO 22514-7 je v mnohých smeroch podobná metóde VDA 5, vzhľadom k tomu, že používajú veľmi podobnú filozofiu vyhodnotenia vhodnosti meracieho systému. Avšak existujú medzi nimi rozdiely v tom, v akom rozsahu a ako dopodrobna sú jednotlivé problematiky rozoberané. Ďalšie rozdiely je možné nájsť v rôznych spôsoboch značenia

niektorých parametrov, či rozdielnych indexoch spôsobilosti. Norma tak akoby predkladá zjednodušenú metodiku VDA 5, ale neobsahuje popis riešení na zníženie vplyvu zložiek neistoty merania v prípadoch, keď je merací proces, alebo samotný merací systém vyhodnotený ako nevhodný.[12][28]

S ohľadom na výhody a nevýhody jednotlivých metód hodnotenia a zamerania tejto diplomovej práce na skúmanie geometrických parametrov, bola vedúcim diplomovej práce, pre ďalšie riešenie zadania, vybraná metóda hodnotenia VDA 5.

4 SÚRADNICOVÉ MERACIE STROJE

Súradnicový merací stroj (ďalej len CMM), z anglického Coordinate Measuring Machine, je meracím systémom s prostriedkami k pohybu snímacieho systému a schopnosťou určovať priestorové súradnice na povrchu meraného dielu.[13]

CMM slúži na meranie geometrických vlastností dielov, či súčiastok, a to predovšetkým rozmeru, vzdialenosti a parametrov geometrických tolerancií (tvaru, orientácie, umiestnenia a hádzania).[14]

V súčasnosti sú v priemyselnej praxi CMM už veľmi dobré prijaté vďaka ich veľkej flexibilita a možnosti jedno, či viac dimenzionálneho merania a zároveň sú považované za najdôležitejšie univerzálne nástroje nielen pre kontrolu jednoduchých ale predovšetkým tvarovo zložitých dielov.[15]

4.1 Konvenčné a multisenzorové súradnicové meracie stroje

Prvými CMM boli meracie mikroskopy, ktoré boli vytvorené už v dvadsiatych rokoch 20. storočia. Okolo roku 1970 boli nasledované vznikom dotykových meracích strojov s automatickým riadením.[14]

Následný vývoj optoelektronických senzorov a automatizácie viedol k vzniku automatizovaných optických meracích strojov. Meracie mikroskopy a projektory boli v deväťdesiatych rokoch 20. storočia postupne vystriedané súradnicovými meracími strojmi s možnosťou spracovania obrazu, čo bolo podmienené predovšetkým výrazným vývojom moderných polovodičových kamier, počítačovej techniky a k nej vhodného softvéru. Integrácia laserových senzorov vzdialenosti potom viedla k vzniku prvých strojov pre multisenzorové súradnicové meranie.[14]

Použitie niekoľkých senzorov v jednom meracom zariadení tak prinieslo možnosť nahradiť viacero jednoúčelových meracích strojov. Pre efektívne riešenie komplexnejších meracích úloh je často potrebné použiť viacero z týchto rôznych senzorov v priebehu jedného merania. Vzdialenosť medzi uložením senzorov a ich meracím rozsahom znižuje ich využiteľný spoločný rozsah merania, hlavne v prípade menších rozmerov multisenzorového súradnicového meracieho zariadenia. Z tohto dôvodu sú často potrebné väčšie rozmery základnej časti takéhoto meracieho zariadenia.[14][31]

Vo všeobecnosti obsahujú multisenzorové CMM kombináciu optických a dotykových senzorov, avšak so stále rastúcou komplexnosťou vyrábaných dielcov a zároveň s ich zmenšujúcimi sa rozmermi rastie dôležitosť predovšetkým optoelektronických senzorov. Napriek ich prínosu v podobe efektívneho, hospodárneho a predovšetkým rýchleho merania, sú stále aj dotykové senzory v prípade merania niektorých prvkov nenahraditeľné.[14]

Ďalší posun v tejto sfére merania prišiel v roku 2005 s strojom Werth TomoScope®, ktorý bol pravdepodobne prvým strojom pre súradnicové meranie s počítačovou tomografiou. Táto technológia umožnila merať komplexné dielce s veľkým množstvom rozmerov, a to aj vnútorných, vo veľmi krátkom čase a s vysokou presnosťou.[14]

Ako vyplýva z textu vyššie, multisenzorové CMM poskytujú dnešnej výrobe tieto zásadné výhody:

- možnosť riešiť rozdielne meracie úlohy pomocou jediného meracieho stroja,

- možnosť merať objekty s prvkami, vyžadujúcimi použitie rôznych senzorov, pri jednom uchytení objektu v spoločnom vzťažnom systéme,
- skrátenie doby merania, vďaka vhodnej voľbe senzorov k danému meraniu a upraveniu presnosti merania rôznych častí meraného objektu podľa potrieb užívateľa.[14]

Tieto výhody viedli v posledných rokoch k nárastu rozšírenia tejto technológie vo viacerých odvetviach hospodárstva. Najintenzívnejšie sa však používajú pri meraní dielcov v automobilovom a spotrebnom priemysle, nástrojárstve a v medicínskej technike.[14]

4.2 Konštrukčné typy súradnicových meracích strojov

Čo sa týka konštrukčného hľadiska sú súradnicové meracie stroje produkované v celom rade konfigurácií a rôznych veľkostiach, od strojov schopných merať veľké priemyselné bloky až po CMM určené pre meranie veľmi malých súčiastok. Najbežnejšie z nich sa však svojím najväčším rozmerom pohybujú v rozsahu od 0,5 do 2 metrov. [13]

Výrobcovia CMM strojov ponúkajú rôzne konštrukčné typy, z pohľadu počtu súradníc je tak možné rozlišovať:

- Jednosúradnicové meracie stroje – umožňujúce merať rozmer v jednej ose „X“. Ich výhodou však je, že sa s nimi dá dosahovať len veľmi malá chyba meradla, zväčša 0,6 až 6 μm , a to v celom rozsahu stroja, teda i pri meraní veľkých rozmerov
- Dvosúradnicové meracie stroje – umožňujú merať rozmery v jednej rovine, teda v dvoch vzájomne kolmých osiach „X“ a „Y“. Typickými príkladmi dvosúradnicových strojov sú mikroskopy, profilprojektory, laserové interferometry, či skenery.
- Trojsúradnicové meracie stroje – umožňujú priestorové meranie, v troch vzájomne kolmých osiach „X“, „Y“ a „Z“. Umožňujú aj zložité rozmerové merania na jedno upnutie meranej súčiastky.[16]

Najbežnejšie používané konvenčné súradnicové meracie stroje obsahujú práve tri lineárne osy a využívajú karteziánsky súradnicový systém. Okrem nich existujú aj súradnicové meracie stroje rozšírené o štvrtú osu, ktorá je najčastejšie rotačná, riešená prídavným otočným stolom a multisenzorové 5osé meracie systémy, ktoré ponúkajú možnosť vysoko výkonného skenovania, bezdotykovej kontroly a analýzu štruktúry povrchu, jediným CMM.[13][49]

Čo sa týka konštrukčných usporiadaní CMM, rozlišujú sa nasledovné základné typy:

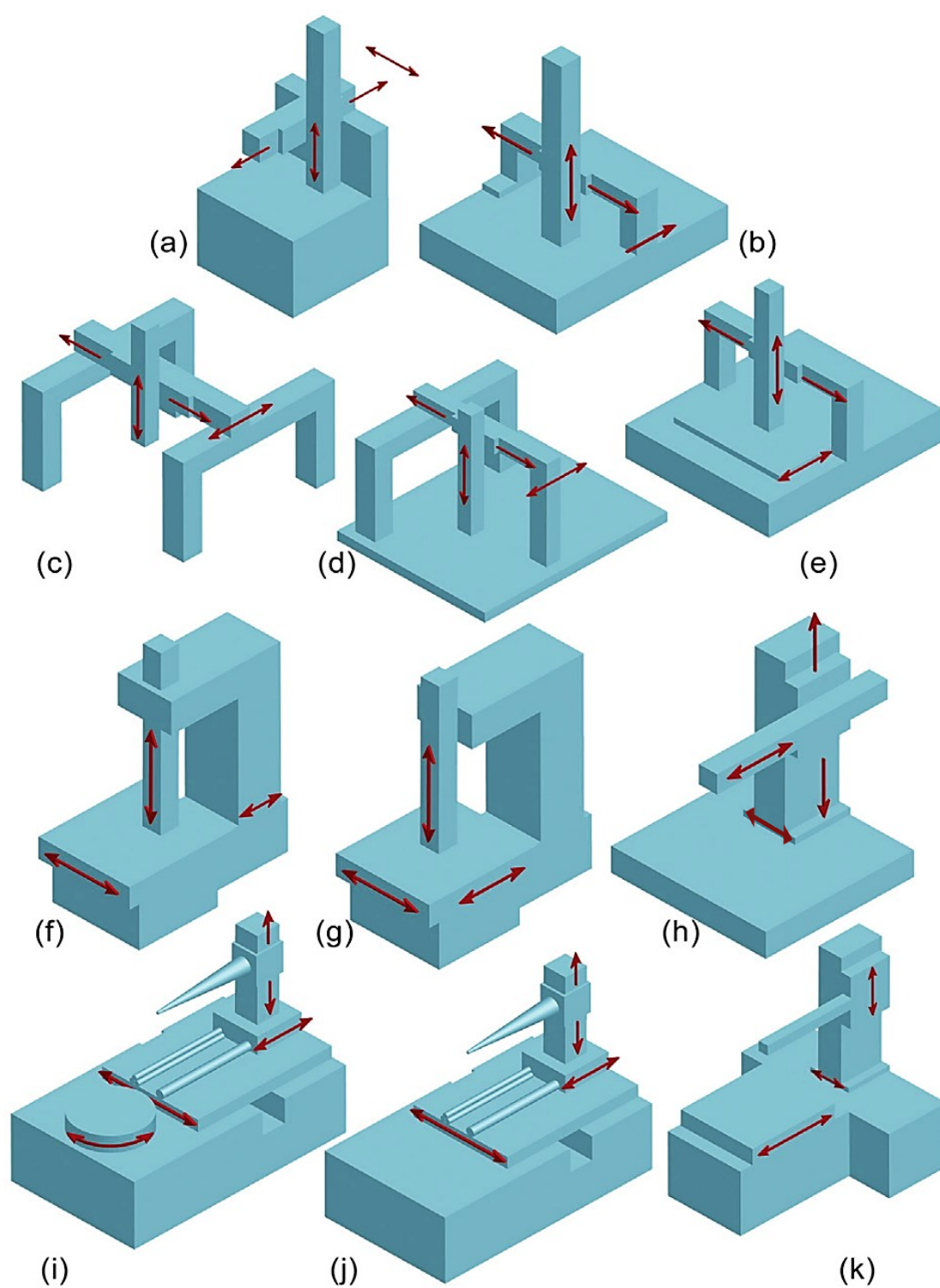
- Stojanový (stĺpový)
kde je meraný objekt upnutý na stole, pohybujúcom sa v smeroch osí X a Y. Meracie sondy sú uložené v pinole vykonávajúcej pohyb v smere osi Z. Vzhľadom ku konštrukciám sú vhodné na meranie súčastí menších rozmerov a vďaka tuhej konštrukcii a vysokej presnosti sú používané najmä v laboratóriách.
- Výložníkový
Kde je opäť meraný objekt upnutý na stôl, avšak nepohyblivý. Pohyb vo všetkých osiach je vykonávaný pinolou na výložníku. Poskytujú veľmi dobrý prístup k meraným súčiastkam, ale vzhľadom ku konštrukcii je nutné ich vyvažovať. Z dôvodu zachovania tuhosti je rozsah osi Y pomerne malý, preto výložníkové CMM sú vhodné skôr pre meranie dlhých úzkych súčiastok.

- Portálový
Na rozdíl od předchozích poskytují jen omezený přístup k měřeným objektům. Vďaka vysokej tuhosti konštrukcie umožňujú vysokú presnosť merania a sú preto najrozšírenejším typom 3D CMM pre stredné a veľké rozsahy meraní.
- Mostový
Charakteristickou vlastnosťou tohto typu je veľkosť konštrukcie. Používajú sa pre meranie rozmermi najväčších objektov (rozsah osi X môže byť až 24m), najčastejšie v leteckom a automobilovom priemysle.[16][18]

Medzinárodná európska norma, v českej verzii označená ČSN EN ISO 10360-1: Geometrické požiadavky na výrobky (GPS) – Prijímací a periodické zkoušky souřadnicových měřicích strojů (CMM) – Část 1: Slovník toto rozdělení rozšiřuje na následovné konstrukční typy CMM:

- a) výložníkový CMM s pevným stolem,
- b) CMM s pohyblivým portálem,
- c) mostový CMM,
- d) CMM s mostem v tvare L,
- e) CMM s pevným portálem,
- f) výložníkový CMM s pohyblivým stolem,
- g) stojanový CMM,
- h) CMM s pohyblivým sloupem a pohyblivým vodorovným ramenem,
- i) sloupový CMM s otočným stolem na základni stroja a vodorovným ramenem,
- j) sloupový CMM s pevným stolem a vodorovným ramenem,
- k) CMM s pohyblivým stolem a vodorovným ramenem.[13][17]

Vymenované konstrukční typy CMM sú zobrazené na obrázku 1 a označené písmenami podľa vyššie uvedeného zoznamu, vychádzajúceho z normy ČSN EN ISO 10360-1.



Obr. 1 Konštrukčné typy CMM[13]

4.3 Senzorické systémy

Voľba vhodného senzoru pre konvenčné, respektíve senzorov pre multisenzorové súradnicové meracie zariadenia zohľadňuje podmienky meraného objektu, a teda požiadavky na presnosť merania a v prípade dotykových senzorov aj na citlivosť dotyku. Zároveň je potrebné brať ohľad aj na aspekty hospodárnosti, čiže celkovú dobu merania a tiež náklady spojené s meraním.[14]

Jedným zo základných kritérií rozlišovania senzorov je fyzikálny princíp, akým prenášajú primárny signál. V súčasnosti je možné väčšinu z dostupných senzorov priradiť ku kategóriám na základe kritéria prenosu dotykcom, respektíve bez dotyku.[14]

4.3.1 Dotykové snímacie systémy

U dotykových senzorov dochádza k prenosu informácie dotykcom meraného objektu so špeciálnym dotykovým prvkom, najčastejšie rubínovou guľičkou. [14]

V priemyselnej praxi sú stále najrozšírenejším typom snímacích systémov. Rozlišujú sa predovšetkým dva druhy takýchto senzorov:

- a) Senzory spínacieho typu
Princíp ich funkcie spočíva v okamžitom zastavení priestorového pohybu senzoru a následného zaznamenania aktuálnych súradníc z odmeriavacieho systému stroja v momente, keď sa dotyk senzoru dotkne meranej súčiastky.
- b) Senzory snímacieho (skenovacieho) typu
Tieto senzory sú počas merania v trvalom kontakte s meraným objektom. V momente keď riadiaci systém zaznamená dotyk meracieho hrotu s povrchom meranej súčiastky, vypne prítlak vyvodzujúci nastavenú meráciu silu a spustí pohony príslušných osí a začne zaznamenávať súradnice meraných bodov.[16]

4.3.2 Bezdotykové snímacie systémy

V prípade bezdotykových snímacích systémov sa rozlišujú optické senzory, prenášajúce informáciu cez pozíciu meracieho bodu z objektu na senzor a senzory pre počítačovú tomografiu, kde dochádza k presvieteniu časti meraného objektu röntgenovým žiarením a zo získaných snímok je rekonštruovaná trojrozmerná geometria meraného objektu, na základe ktorej sa vychádza pri určovaní pozície meraných bodov.[14]

V rámci vývoja techník merania predstavovalo v oblasti optických súradnicových strojov (meracích mikroskopov a projektorov) desiatky rokov jediný dostupný senzor ľudské oko. Avšak ľudské oko ako nástroj vizuálneho merania je ovplyvnené subjektívnymi podmienenými odchýlkami. Patria k nim predovšetkým chyba paralaxy (krivý náhľad, alebo tiež perspektívna chyba) a chybné vyhodnotenie prechodov medzi svetlým a tmavým miestom, napríklad vnímanie hrán, čo je podmienené logaritmickou citlivosťou ľudského oka na svetlo.[14]

Dnes už úlohu ľudského zraku preberajú optoelektronické senzory, ktoré rovnakým princípom sledujú meraný objekt buď kolmo na optickú osu (laterálne senzory – senzory spracovania obrazu), alebo pozdĺžne k optickej osi pri zaostraní (axiálne snímače – snímače vzdialenosti).[14]

Väčšina najčastejšie dostupných bezdotykových meracích zariadení a k nim pripojených zobrazovacích zariadení (zväčša kombinácia CCD kamera a PC monitor) transformuje 3D scénu na 2D obraz a tým sa stráca informácia o súradnici „z“, hoci konštrukčne

je v meracom zariadení obsiahnutá. Tento problém je možné riešiť rôznymi spôsobmi, či už metódami snímania založeného na optických princípoch triangulácie, optickej interferometrie a merania doby letu svetla, alebo tiež využitím metód počítačovej tomografie, alebo magnetickej rezonancie.[16]

Ďalším o niečo menej presným ale veľmi efektívnym spôsobom odmeriavania súradnice „Z“ je zabudovanie lineárnych odmeriavacích systémov, napríklad závitových hriadeľov s uhlovým prevodníkom, do manuálnych, či automatizovaných posuvov meracieho stroja.[16]

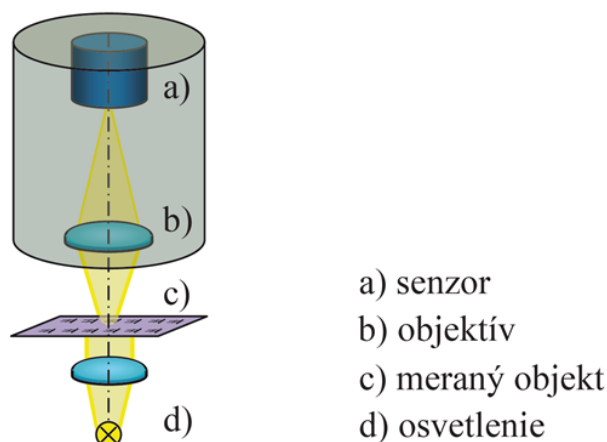
Vzhľadom k faktu, že v súčasnosti existuje už veľké množstvo rôznych senzorov určených pre optické meracie zariadenia, sú v nasledujúcom texte popísané len niektoré reprezentatívne druhy týchto senzorov.

Senzor spracovania obrazu

Vďaka flexibilným možnostiam využitia, dobrej vizualizácii objektov a meraných vlastností, patria senzory spracovania obrazu k základným výbavám väčšiny optických konvenčných aj multisenzorových súradnicových meracích strojov. Tieto senzory určujú odchýlku bodov na objekte od osi senzoru (súradnice senzora x, y v rovine objektu). Meraný objekt (viď obrázok 2c) sa väčšinou osvieti svetelným zdrojom zo spodnej strany (viď obrázok 2d) a cez objektív (viď obrázok. 2b) sa zobrazí na matricovej kamere (viď obrázok 2a). Elektronický systém kamery prevedie optické signály na digitálny obraz, ktorý sa ďalej použije pre výpočet meraných bodov vo vyhodnocovacom počítači, použitím príslušného softvéru pre spracovanie obrazu. Výkonnosť týchto senzorov je zásadne ovplyvňovaná jednotlivými komponentami senzoru, či už je to polovodičová kamera, projekčná optika, svetelné systémy, elektronika pre spracovanie signálu, ale aj algoritmus spracúvajúci zosnímaný obraz.[14]

CCD kamera (CCD – Charge Coupled Device – zariadenie s viazanými nábojmi)

Ďalším senzorickým systémom používaným k meraniu a digitalizácii snímaného obrazu je kombinácia CCD kamery a elektroniky pre spracovanie snímaného obrazu. CCD kamery majú dobrú metrologickú kvalitu a lineárny vzťah medzi vstupným signálom a digitálnym výstupným signálom, čo je potrebné pre presné meranie. Rovnako, ako aj u senzorov spracovania obrazu, má softvér, ktorým sa zisťujú merané body z digitalizovaných dát obrazu, významný vplyv na kvalitu výsledkov merania.[14]



Obr. 2 Konštrukcia senzoru spracovania obrazu[31]

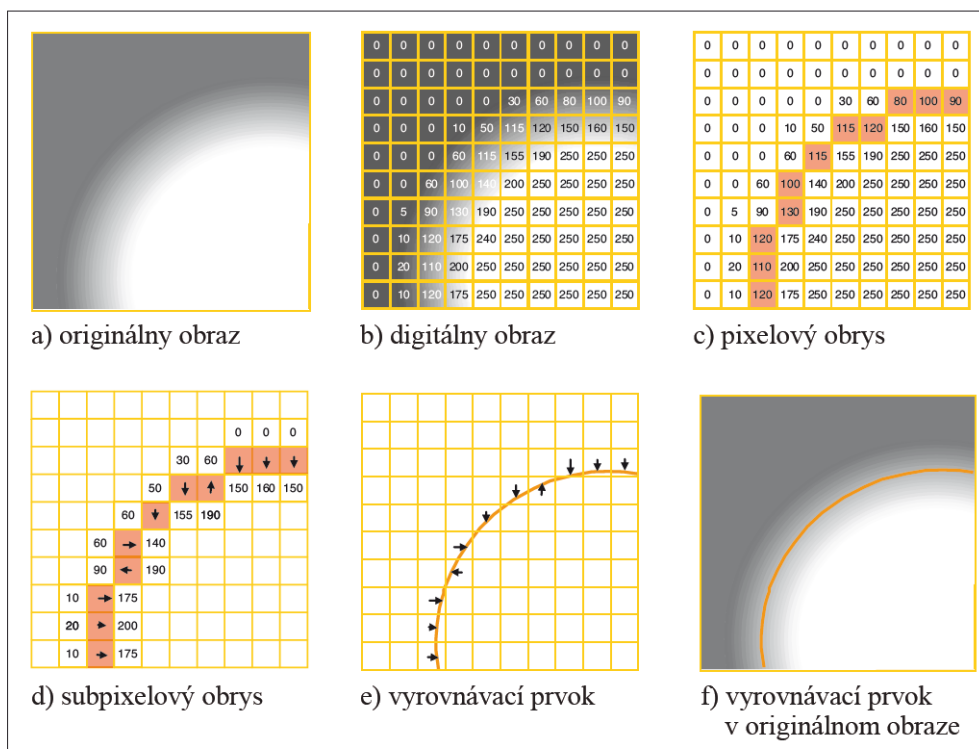
Rozlišujú sa dve koncepcie softvéru:

- „Edge Finder“ (vyhľadávač hrán),
- Spracovanie obrysového obrazu.[18]

Koncepcia vyhľadávač hrán je najjednoduchšou metódou určovanie meraných bodov, kedy sú v obraze zisťované body prekrytia preddefinovaných priamok s viditeľnými kontúrami objektu. Toto sa postupne opakuje na mnohých miestach vo vopred určenej vyhodnocovacej oblasti. Tak vznikne množstvo meraných bodov, ktoré sú v okne zlúčené do skupiny. Pre určenie každého jednotlivého bodu sa však uskutoční samostatné jednorozmerné vyhodnotenie. Rozsiahla dvojrozmerná informácia obsiahnutá v obraze sa tak ale nezohľadní, čo vedie k problémom, obzvlášť v prípadoch meraní s osvietením. Vznikajúce rušivé obrysy spôsobené povrchovými štruktúrami, zlomami a znečistením sa dajú rozoznať a kompenzovať len podmienene.[14]

Pri spracovaní obrysového obrazu je originálny obraz v rámci vyhodnocovacieho okna zobrazovaný ako plošný celok. Obrysy sa v tomto obraze extrahujú vhodnými matematickými algoritmami do digitálnych amplitúd. Každému obrazovému bodu obrysu (prvok obrazu = pixel) sa potom priradí meraný bod. Merané body sa radia za sebou, čo umožňuje zistiť rušivé vplyvy pri meraní a odfiltrovať ich, bez toho že by sa zmenil tvar obrysu. Pre praktické využitie je dôležité, že vo vnútri zachytenej oblasti môže byť viacero rôznych obrysov.[14][18]

Moderné systémy spracovania obrysového obrazu pri ďalšom kroku interpolujú súradnice meraných bodov v rámci pixelového rastru (subpixelový obrys), čím sa dosiahne väčšej presnosti. Zo subpixelového obrysu následne vypočítajú vyrovnávací prvok, napríklad Gaussovou metódou a následne sa tento zobrazí v originálnom obraze, ako je viditeľné na obrázku 3.[14]



Obr. 3 Postup výpočtu vyrovnávacieho prvku z originálneho obrazu[31]

Senzory s autofokusom

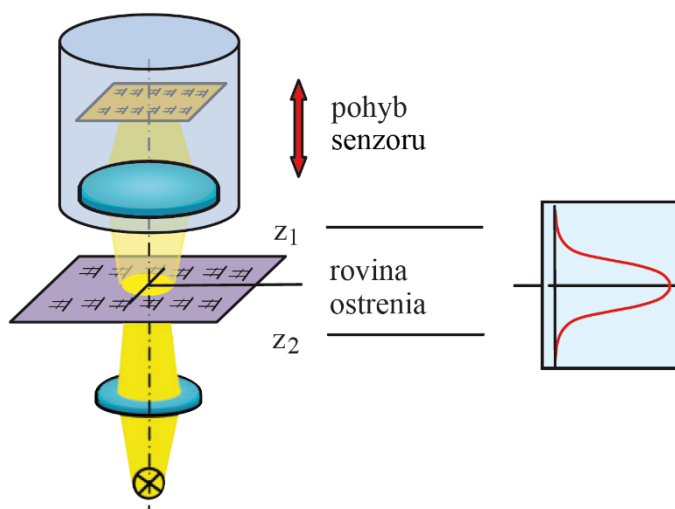
V rámci merania so senzorom s autofokusom sa určuje vzdialenosť medzi senzorom a meraným objektom pomocou rovnakých hardvérových komponent, aké sa používajú pri senzoroch spracovania obrazu. Snímaný obraz je však ostrý len v jednej pozícii. Pre definovanie hodnoty ostrosti obrazu je možné použiť veličinu – kontrast. Platí, že ak sa senzor pohybuje v smere svojej optickej osi, v rozsahu z_1 až z_2 k rovine meraného objektu (viď. obrázok 4), hodnota kontrastu dosiahne svoje maximum práve vtedy, keď sa rovina zaostrovania a rovina objektu prekryjú. Z tejto pozície senzoru je možné následne určiť polohu bodu na povrchu objektu, na ktorý bude polohovaním nastavené ostrenie – autofokus. Funkcia autofokusu je používaná na určovanie meraných plôch pre spracovanie obrazu a pre meranie výškových úrovní. Citlivosť nastavenia autofokusu je ovplyvnená hĺbkou ostrosti, teda veľkosťou optickej osy, ktorú použitý objektív zobrazuje ako zdanlivo ostrú. Hĺbka ostrosti je závislá na rozlíšení a numerickej apertúre (účinnnej svetelnosti) objektívu. Čím je numerická apertúra väčšia, tým je menšia hĺbka ostrosti a meranie autofokusom presnejšie.[14]

Laserový senzor

Laserové senzory predstavujú alternatívny princíp pre meranie vzdialeností. Samotný proces merania spočíva v premietaní svetelného lúča z laserovej diódy, jeho odrazu v podobe svetelného bodu, ktorý zosníma optoelektronický senzor a následne vhodným postupom vyhodnotí polohu meraného bodu. Väčšina používaných laserových senzorov využíva buď triangulačnú alebo interferometrickú metódu snímania.[18]

Triangulačné senzory sú často používané v automatizačnej technike. Princíp ich funkcie je založený na vytvorení trojuholníka medzi meraným bodom a senzorom, pomocou vychýlenia laserového lúča od osi zobrazovacej optiky senzora, tak aby zvierali uhol veľkosti niekoľko desiatok stupňov. Zo vzniknutého trojuholníku sa dá určiť pomocou triangulácie (vzťahov medzi uhlami) meraná vzdialenosť. Výsledok merania je podstatne podmienený štruktúrou a uhlom sklonu meraného povrchu.[14]

V prípade interferometrických senzorov je laserová triangulačná metóda rozšírená na dvojrozmerné meranie, uvedením laserového lúča do pohybu pomocou pohyblivého zrkadla, ktoré je integrované do hlavy senzora. Vyhodnotenie prebieha použitím matricovej kamery



Obr. 4 Určenie ostriaceho bodu pohybom senzoru v rozsahu z_1 a z_2 [31]

a získaním výsledku merania pre veľké množstvo bodov pomocou triangulácie. Tým sa zmeria línia na povrchu meraného objektu.[14]

Skenovaním pomocou laserového senzoru sa získava veľké množstvo bodov, ktoré je možné filtrovať na trojuholníkovú sieť, použiteľnú napr. pre pevnostné výpočty súčiastok. Ďalšie uplatnenie nachádza táto technológia aj v tzv. reverznom inžinierstve, teda vytváraní 3D modelu a výkresovej dokumentácie zo súčiastky neznámeho tvaru. Ďalším možné použitie sú komplexné porovnávanie naskenovanej súčiastky s jej CAD modelom, či meranie poddajných súčiastok, ktoré nie je možné merať dotykovými metódami.[14]

Nevýhodou laserových senzorov je však citlivosť na lesklé plochy. V prípadoch, keď je však nutné využiť tieto senzory na lesklé povrchy, musia byť tieto upravené špeciálnym typom postreku veľmi jemným práškovým sprejom.[18]

4.4 Dotykové vs. bezdotykové meracie stroje

Investície do správnej meracej technológie môžu výrobcom zlepšiť kvalitu výroby a zároveň znížiť výrobné náklady. [19]

Dotykové a bezdotykové zariadenia sú vhodné pre rôzne aplikácie a ich výber je podmienený predovšetkým dosahovanou presnosťou a rýchlosťou merania, celkovými nákladmi, ale aj objemom a zložitou súčiastok, ktoré majú byť kontrolované.[20]

V procese výberu vhodnosti jednotlivých meracích súradnicových strojov je preto dôležité k týmto požiadavkám prihliadať. [20]

Pre obidve kategórie meracích strojov však platí, že rýchlejšie meranie nebude tak presné, ale zároveň čím presnejšie bude, tým bude jeho cena vyššia.[20]

Tradičné dotykové súradnicové meracie stroje poskytujú vysoko presné meranie geometrie súčiastok, avšak obvykle vyžadujú dlhú dobu nastavenia, ktorá zahŕňa špeciálne programovanie a nutnosť zaškolenia obsluhy, čím sa skracuje čas, počas ktorého na meracom stroji skutočne prebieha meranie súčiastok. A aj po samotnom nastavení je zber meraných dát pomalý. Z týchto dôvodov sú dotykové CMM všeobecne vhodné pre odber vzoriek z výroby, či predvýrobnej série a nevhodné pre stopercentnú kontrolu súčiastok stredných, či veľkých výrobných sérií.[19]

Ďalšou ich nevýhodou je často robustná konštrukcia a nutnosť upevniť takéto meracie stroje na jednom konkrétnom mieste. V porovnaní s bezdotykovými CMM dosahujú všeobecne vyššiu presnosť meraní, avšak v prípadoch meraní zložitejších súčiastok môžu prinášať nejednoznačné výsledky.[20]

Bezdotykové súradnicové meracie stroje umožňujú merať s vysokou presnosťou, väčšie množstvá súčiastok v priebehu krátkych časových úsekov. Často obsahujú softvér s možnosťou vytvárania plánov merania, slúžiacich k rýchlemu nastaveniu kontrol viacerých súčiastok. Bezdotykové stroje sú tak pre mnohé výrobné aplikácie pohodlným riešením na vykonávanie stopercentnej kontroly veľkých výrobných sérií.[19]

Bezdotykové meracie systémy je možné často jednoducho automatizovať, ako v priebehu meraní, tak i v rámci uskutočňovania analýz nameraných dát. Táto možnosť môže často napomôcť k rýchlej identifikácii problémov vo výrobe.[20]

Pri výbere bezdotykových systémov je dôležité zohľadňovať fakt, že nie všetky z nich sú vhodné pre testovanie všetkých materiálov. Problematickým môže byť najmä meranie vysoko reflexívnych povrchov.[20]

Ďalším nemenej dôležitým, môže byť rozhodovanie podľa inšpekčného softvéru. Jednotlivé meracie systémy bývajú často dodávané s vlastným softvérom. Je vhodné zvažovať jeho zložitosť a nutnosť školenia obslužných pracovníkov. Softvér pre dotykové meranie býva často užívateľsky zložitejší v porovnaní so softvérmi pre bezdotykové meranie, ktoré sú často riešené intuitívnym grafickým rozhraním. Súčasne softvér pre dotykové meracie zariadenia obvykle nedokáže spracovávať veľké dátové sady. U softvéru pre bezdotykové meranie je tiež v niektorých prípadoch potrebné zvažovať dostupnosť referenčných dát v CAD súboroch, avšak väčšina dnes dodávaných softvérových riešení už nutne tieto dáta nevyžaduje.[20]

Z pohľadu financií sú vo všeobecnosti počiatočné náklady na obstaranie dotykového CMM nižšie v porovnaní s bezdotykovými, avšak v závislosti na zmenách vo výrobnom sortimente, či jeho úpravách, môže dochádzať k vzniku vyšších prevádzkových nákladov, či už z pohľadu potreby výmen opotrebovaných sond, riadiacich programov a nastavenia kompenzácií, či plátov za vyššie kvalifikovaných pracovníkov.[19]

V prípadoch rôznorodej veľkosériovej výroby, sú tak bezdotykové CMM výhodnou investíciou vďaka skráteným časom nastavovania, vysokej presnosti a rýchlosti uskutočňovania meraní a tiež vysokej návratnosti počiatočnej investície.[19]

4.5 Zdroje chýb a presnosť merania

Je nepopierateľným faktom, že každý merací stroj je do istej miery nedokonalý. Hoci i minimálna nepresnosť, s akou sa na neho prenášajú veľkosti meraných jednotiek, ako aj mnoho ďalších faktorov, spôsobujú chyby merania. Chyby merania sú v zásade nevyhnutné, pretože meranie je experimentálny postup a skutočná hodnota meranej veličiny je abstraktným pojmom. S nepretržitým vylepšovaním metód merania i samotných meracích strojov sa však tieto chyby znižujú. Príkladom môže byť vplyv operátora na neistotu merania, ktorý sa postupnou digitalizáciou meracích strojov podstatne eliminoval.[29]

Ďalším príkladom obmedzenia zdrojov chýb je meranie a programová korekcia geometrických chýb súradnicových meracích strojov, ktoré pochádzajú z 21 zdrojov. Konkrétne v prípade trojsúradnicového meracieho zariadenia, má každá os jednu lineárnu chybu, tri chyby rotácie a dve chyby priamosti. Posledné tri z týchto zdrojov predstavujú chyby ortogonalít medzi jednotlivými osami. Tieto chyby je možné odmerať napríklad použitím laserového interferometru, autokolimátorov, či dosiek s kalibrovanými otvormi a pri následnej kalibrácii sa do meracieho systému zaznamenajú hodnoty korekcií.[13]

V prípade hodnotenia presnosti súradnicových meracích strojov sú vyhodnocované nasledovné atribúty:

- Rozlíšenie – popis najmenších elementov rozoznatelných senzorom, respektíve merateľným strojom, alebo dané špecifikáciou najmenšieho prvku. Rozlišuje sa štruktúrne rozlíšenie (popis najmenšej možnej veľkosti štruktúry, napríklad otvoru, či zaoblenia, ktoré je možné zaznamenať a zmerať oddelene od ostatných susedných štruktúr) a priestorové rozlíšenie, ktoré popisuje najmenší merateľný lokálny rozdiel nameraných bodov.

- Špecifikácia a skúška prijateľnosti – definovanie charakteristických veličín, aby bolo možné špecifikovať a kontrolovať metrologickú výhodnosť stroja. Kontrola sa sústreďuje hlavne na odchýlku snímania a odchýlku merania dĺžky.
- Neistota merania – najdôležitejšia vlastnosť súradnicového meracieho stroja je dosiahnutie minimálnej neistoty merania geometrických prvkov na meraných dieloch. Je nutné sledovať aj vplyvy na neistotu merania a používať postupy na ich zníženie.
- Vhodnosť meracieho procesu – stanovenie a kontrola vhodných hodnôt neistoty merania voči toleranciám geometrických prvkov.
- Teplota – u rozmerovo väčších dielov a pri vyšších požiadavkách na presnosť je nutné korigovať vplyv teploty. Pri nekompenzovaní teplotného vplyvu má merania zmysel len pri dodržaní prísnych laboratórnych podmienok.[14]

Primárne vplyvy na neistotu merania na meracích CMM sú vymenované v norme ČSN EN ISO 14253-2. Jedná sa o nasledujúce:

- Prostredie merania
Vo väčšine prípadov je hlavnou zložkou teplota, či už jej absolútna hodnota, alebo zmena v čase. Okrem nej však majú vplyv aj zloženie a prúdenie vzduchu, teplotná rovnováha stroja, vlhkosť, tlak, osvetlenie, tepelné žiarenie, či hluk alebo vibrácie.
- Referenčný prvok meracieho stroja
Chyby z referenčného prvku môžu pochádzať z neistoty jeho kalibrácie, ubehnutej dlhej doby od poslednej kalibrácie, nevyhovujúcej stálosti, či teplotnej rozťažnosti.
- Merací stroj
Rovnako ako u referenčného prvku, aj merací stroj môže byť zdrojom chýb plynúcich z dlhej doby od poslednej kalibrácie alebo teplotnej nestálosti. Okrem nich môžu ďalšie chyby pochádzať napríklad z geometrickej nedokonalosti meracieho stroja, nedostačujúcej tuhosti, klzných vedení, nestálosti nulového bodu, elektronického alebo mechanického zväčšenie, či systému odčítavania hodnôt.
- Nastavenie meraní
Nestabilne umiestnený alebo nevhodne osvietený meraný objekt, vedie k vnášaniu chýb pri odčítavaní meraných hodnôt.
- Software a výpočty
Chyby môžu byť prenášané zaokrúhľovaním, zavedením a korekciou algoritmov, interpoláciami, filtrovaním meraných údajov, či nevhodne zvoleným algoritmom pre výpočet.
- Metrológ
Schopnosť ľudskej obsluhy sa mení v priebehu dňa. Okrem nej na výsledky meraní majú vplyv aj vzdelanie, výcvik, skúsenosti, znalosti, fyzické schopnosti, čestnosť, či nadšenie z práce.
- Meraný objekt
Na výsledky merania môže mať vplyv napríklad starnutie, nečistota, deformácie, vnútorné napätie, textúra povrchu alebo odchýlky tvaru meraného objektu.

- Stanovenie charakteristiky GPS, charakteristika meracieho stroja.
Chybné nastavenie referenčného systému, základne, uhlov, vzdialeností, či stupňov voľnosti môžu mať zásadný vplyv na výsledky merania.
- Postup merania
V prípade chýb z postupu merania sa jedná o chybné voľby trvania, princípu, počtu a poradí meraní, voľbu aparatury a metrológa, či nesprávne zvolený princíp a stratégie sondovania.
- Fyzikálne konštanty
Neznalosť správnych fyzikálnych hodnôt môže viesť k nesprávnym meracím postupom, ale aj k chybnému vyhodnoteniu výsledkov.[30][33]

V podskupine optických súradnicových meracích strojov predstavujú najvýznamnejšie z týchto vplyvov na neistotu merania – okolité prostredie, či už jeho teplota, tlak a vlhkosť, ale tiež aj prach a okolité svetelné zdroje.[21]

5 VHODNOST MERACIEHO STROJA PODĽA VDA 5

Príručka VDA 5 uvádza, že vhodnosť meracieho systému (vyjadrená ukazovateľom vhodnosti Q_{MS}) by mala byť hodnotená samostatne a nie len ako súčasť hodnotenia procesu merania ako celku. Zároveň stanovenie vhodnosti meracieho systému, býva spravidla jednoduchšie, než stanovovanie vhodnosti procesu merania. Avšak rovnako v oboch prípadoch je zásadným rozhodovacím ukazovateľom rozšírená neistota merania.[4]

Prvou úlohou, pred začatím samotného procesu stanovenia vhodnosti meracieho systému (ďalej označeného aj skráteno MS), respektíve meracieho stroja, je zodpovedanie si otázok ohľadom rozlíšenia - citlivosti meracieho systému: Je jeho rozlíšenie dostatočné? A je dostatočné len vzhľadom k toleranciam výrobného procesu, alebo aj k samotnej šírke procesu? Citlivosť meracieho systému je dôležitá preto, aby bolo možné na základe zozbieraných dát, včas odhaliť rôzne posuny v kvalite výroby. V postupe popísanom vo VDA 5 je definovaná podmienka, že rozlíšenie (%RE) meracieho systému musí byť menšie ako 5% tolerance znaku. U digitálnych strojov je rozlíšením najmenšia stála zobrazovaná hodnota. U analógových sa rozlíšením rozumie tzv. najmenšia bezpečne vyhodnotiteľná hodnota kroku, čiže vzdialenosť medzi dvoma dielikmi na stupnici meradla. Vyhodnocované rozlíšenie je však vždy potrebné dať do kontextu výrobných tolerancií a šírky výrobného procesu. V prípade, ak definovaná podmienka pre rozlíšenie nie je splnená, je merací systém nevhodný a musí byť použitý iný merací systém.[4][10]

5.1 Postup stanovenia vhodnosti

Po splnení podmienky rozlíšenia stupnice MS, pokračuje postup stanovenia vhodnosti vyšetrením ďalších zložiek neistoty, ktoré predstavujú neistota vznikajúca pri kalibrácii referenčného etalónu, precíznosť opakovateľnosti na etalóne, systematická odchýlka merania, odchýlka linearít a neistoty spôsobené tzv. zvyškovými zdrojmi, ktoré majú vplyv na merací systém. Určenie jednotlivých zložiek prehľadne zobrazuje tabuľka 1 a sú bližšie rozobrané v ďalšom texte. V prípade určovania štandardnej neistoty z neistoty kalibrácie etalónu, sa táto môže určiť z údajov uvedených v kalibračnom liste. Skúmanie jednotlivých zložiek neistoty však možno vynechať, pokiaľ je najväčšia dovolená chyba merania (medzná hodnota chyby) MPE známa, dokumentovaná a akceptovateľná. Kombinovaná štandardná neistota pre merací systém u_{MS} sa potom za predpokladu rovnomerného rozdelenia, stanoví podľa vzťahu:

$$u_{MS} = MPE / \sqrt{3}. \quad (1)$$

V ďalšom kroku, v prípade, že nie je vychýlenie kompenzované výpočtom, sa na základe meracieho systému a meracej úlohy vykonajú opakované merania, buď na jednom, dvoch alebo troch etalónoch, prípadne inom referenčnom diely, pričom sú tieto rozložené s ohľadom na merací rozsah, alebo rozsah použitia vo vzťahu k meraciemu procesu. Tiež sa vhodným spôsobom nastaví aj pracovný bod, respektíve pracovné body na meracom systéme. Z nameraných hodnôt sa stanovujú neistoty merania spôsobené systematickou odchýlkou a rozptylom MS.[4]

Tab. 1 Typické zložky neistoty merania MS[4]

Zložka neistoty	Symbol	Určenie / Model
Rozlíšenie stupnice	u_{RE}	<p>Platí podmienka, že %RE musí byť menšie ako 5% tolerancie. Štandardná neistota z rozlíšenia stupnice je daná vzťahom:</p> $u_{RE} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{RE}{2} \right) = \frac{1}{\sqrt{12}} RE$ <p>Aplikuje sa predovšetkým v prípadoch keď hodnota štandardnej neistoty z opakovaných meraní $u_{EVR} < u_{RE}$ (napríklad ak pri meraní priemeru $20 \pm 0,2$ mm, meradlom s rozlíšením 0,01 mm je nameraná 25-krát rovnaká hodnota 20,00 mm).</p>
Neistota kalibrácie	u_{CAL}	<p>Z kalibračného protokolu etalónu.</p> <p>V prípade, že je neistota v protokole uvedená ako rozšírená neistota, musí byť vydelená príslušným koeficientom rozšírenia:</p> $u_{CAL} = U_{CAL} / k_{CAL}$
Opakovateľnosť na etalóne	u_{EVR}	<p>S ohľadom na merací systém sa uskutočňujú opakované merania na jednom, dvoch alebo troch etalónoch.</p> <p>V prípade merania na jednom etalóne sa spravidla uskutočňuje aspoň 25 opakovaných meraní, z ktorých je stanovený rozptyl $u_{EVR} = s_g$</p> <p>V prípade dvoch etalónov sa na každom z nich uskutočňuje spravidla aspoň 15 opakovaných meraní, z ktorých sa stanoví rozptyl u_{EVR} a následne je použitá najvyššia hodnota z výsledkov.</p> <p>Na troch etalónoch sa uskutočňuje spravidla aspoň 10 opakovaných meraní a z nich je stanovený rozptyl u_{EVR} a je použitá najvyššia hodnota zo získaných výsledkov.</p>
Systematická odchýlka	u_{Bi}	<p>Z nameraných hodnôt zo skúmania opakovateľnosti na etalónoch sa určí štandardná neistota u_{Bi} systematickej odchýlky podľa vzťahu:</p> $u_{Bi} = \frac{ \bar{x}_g - x_m }{\sqrt{3}}$ <p>V prípade dvoch alebo troch etalónov je vždy použitá najvyššia hodnota výsledku.</p>
Odchýlka linearity	u_{LIN}	<p>Pri vyšetrovaní linearity je vypočítaná u_{LIN} pomocou metódy ANOVA. U systémov s lineárnou stelesnenou mierou sa odchýlka linearity zistí z kontrolného certifikátu výrobcu alebo z kalibračného listu.</p>
Zvyškové zdroje	u_{MS_REST}	<p>Všetky ďalšie možné vplyvy pôsobiace na merací systém, pokiaľ existujú alebo ich je možné predpokladať, je potrebné posudzovať oddelene samostatným experimentom, z tabuliek alebo informácií od výrobcu.</p>

V prípadoch, keď merací systém umožňuje korekciu vychýlenia (odchýlka linearity u_{LIN} nie je známa), vyšetrí sa regresná funkcia metódou ANOVA. Pre účely tohto vyšetrenia sa uskutočnia opakované merania na minimálne troch etalónoch, rozložených tak, aby pokrývali celý merací rozsah. Namerané hodnoty sa použijú na stanovenie regresnej funkcie a uskutoční sa kompenzácia. Kompenzácia však neodstráni zvyškové neistoty, tvorené zvyškovými smerodajnými odchýlkami u_{EVR} a chybami prispôsobenia u_{LIN} , preto je potrebné obe tieto zvyškové neistoty brať do úvahy pri stanovení kombinovanej štandardnej neistoty meracieho systému u_{MS} . [4][10]

V záverečnej časti postupu stanovenia vhodnosti MS sa určí rozšírená neistota merania U_{MS} a pomocou nej ukazovateľ vhodnosti Q_{MS} a stanoví sa k nemu odpovedajúca limitná hodnota Q_{MS_max} . Navrhovaná limitná hodnota vhodnosti meracieho systému je $Q_{MS} = 15\%$ (v prípade hodnotenia vhodnosti procesu merania $Q_{MP} = 30\%$). Príručka VDA 5 ale zároveň zdôrazňuje, že táto hodnota slúži len ako orientačný údaj a nie je možné ju zovšeobecňovať. V technickej praxi by v jednotlivých prípadoch mali byť limitné hodnoty stanovené dohodou medzi zákazníkom a dodávateľom na základe individuálnej dohody vzťahnutej k príslušnej meranej charakteristike a jej špecifikácií (veľká, respektíve malá až veľmi malá tolerancia) a zároveň s prihliadnutím aj na ekonomické a technické požiadavky. Všeobecne tak platí, že limitná hodnota by mala byť nastavená tak veľká, ako je to len možné avšak zároveň tak malá, ako je to potrebné. [4]

V prípade že sa dokáže, že ukazovateľ vhodnosti $Q_{MS} \leq Q_{MS_max}$, znamená to, že sú limitné hodnoty dodržané a merací systém môže byť ohodnotený ako vhodný. [10]

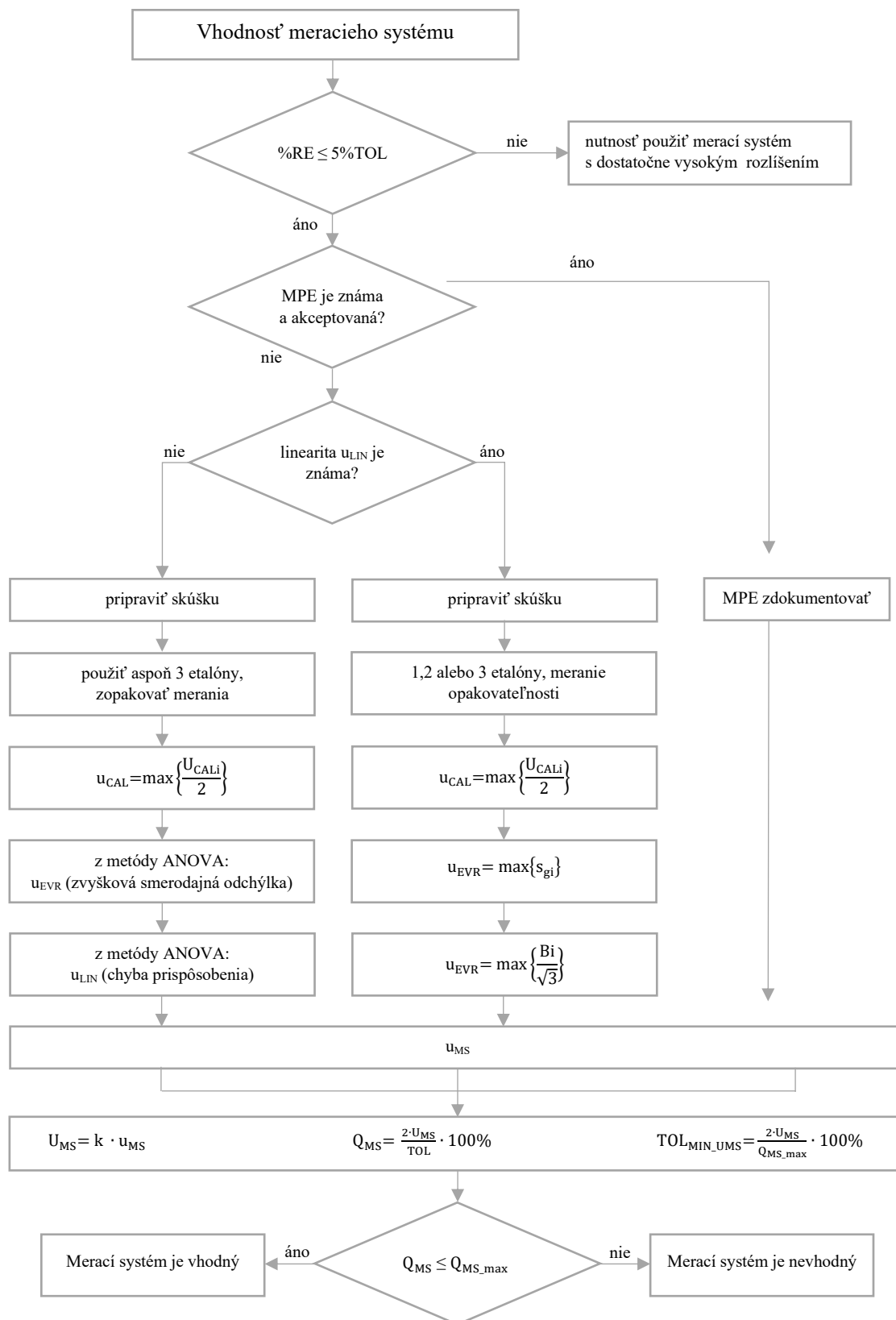
Aby bolo možné merací systém klasifikovať, je vhodné stanoviť aj minimálnu možnú toleranciu meracieho systému TOL_{MIN_UMS} , pri ktorej je ešte stále ohodnotený ako vhodný. [4]

Celý tento postup pre stanovenie vhodnosti meracieho systému prehľadne graficky zobrazuje vývojový diagram na obrázku 5.

Vzťahy pre výpočet kombinovanej neistoty merania, rozšírenej neistoty merania, ukazovateľa vhodnosti, ako aj minimálnej tolerancie meracieho systému sú uvedené v tabuľke 2.

Vhodnosť meracieho systému, ale tiež aj celého meracieho procesu je možné zobrazovať prehľadne pomocou súhrnnej tabuľky bilancie neistôt. Vzor takejto tabuľky uvádza VDA 5 a v tejto diplomovej práci ho zobrazuje tabuľka 3. [4]

Najdôležitejšou hodnotou, vyplývajúcou z bilancie neistôt je rozšírená neistota a to U_{MP} v prípade, že je vyhodnocovaný celý merací proces a U_{MS} v prípade vyhodnocovania meracieho systému. Týmito neistotami je zaťažená každá nameraná hodnota pri následných meraniach uskutočňovaných v prevádzke stroja. [4]



Obr. 5 Postup stanovenia vhodnosti meracieho systému podľa VDA 5[4]

Tab. 2 Stanovenie neistoty merania MS[4]

Zložky neistôt	Symbol	Kombinovaná neistota merania	Rozšírená neistota merania	Vhodnosť minimálnej tolerancie
Rozlíšenie meradla	u_{RE}	$u_{MS} = \sqrt{u_{CAL}^2 + \max\{u_{EVR}^2, u_{RE}^2\} + u_{Bi}^2 + u_{LIN}^2 + u_{MS_REST}^2}$ alebo $\sqrt{\frac{MPE^2}{3}}$ alebo $\sqrt{\frac{MPE_1^2}{3} + \frac{MPE_2^2}{3} \dots}$	$U_{MS} = k \cdot u(y)$	$Q_{MS} = \frac{2 \cdot U_{MS}}{TOL} \cdot 100\%$ $TOL_{MIN-UMS} = \frac{2 \cdot U_{MS}}{Q_{MS_max}} \cdot 100\%$
Kalibrácia etalónu	u_{CAL}			
Systematická odchýlka merania	u_{Bi}			
Chyba linearity	u_{LIN}			
Opakovateľnosť na etalóne	u_{EVR}			
Zvyšková neistota MS	u_{MS_REST}			
Limitná hodnota odchýlky merania	MPE			

Tab. 3 Bilancia neistôt[4]

Štandardná neistota (Názov)	Metóda	Medzná hodnota a	Faktor rozdelenia b	Smerodajná odchýlka resp. ANOVA	Štandardná neistota (Hodnota)
$u(x_i)$	A/B	Metoda B		Metoda A	$u(x_i)$
Názov $u(x_i)$	A				$u(x_i) = s_i$ alebo ANOVA
⋮	⋮				⋮
Názov $u(x_i)$	B				$u(x_i) = a \cdot b$
⋮	⋮			⋮	⋮
Kombinovaná neistota merania					$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n u(x_i)^2}$
Rozšírená neistota merania					$U_{MS} = k \cdot u(y)$ $U_{MP} = k \cdot u(y)$

5.2 Systematické odchýlky, opakovateľnosť a linearita

Problematika vyšetrovania neistôt spojených s meracími systémami je v priemyselnej praxi zvyčajne redukovaná na neistotu opakovateľnosti, neistotu kalibrácie použitého etalónu a neistotu systematickej odchýlky meraní.[4]

V prípade určovania neistoty opakovateľnosti na etalóne je odporúčané používanie experimentu, známeho ako Postup 1 (z anglického Type-1 Study), ktorý bol vytvorený pre určovanie indexov spôsobilosti systému merania C_g resp. C_{gk} . Tento experiment je možné použiť aj v prípade rozšírenia na dva alebo až tri etalóny.[4][22]

Ak je potrebné stanovenie linearity meracieho systému, je toto možné pomocou štúdie linearity, ktorá je založená na použití minimálne troch etalónov (referenčných štandardov). Výsledkom štúdie je regresná funkcia, použiteľná na korekciu výsledkov merania, ktoré umožňujú zníženie neistoty odchýlky linearity.[4]

5.2.1 Systematické odchýlky merania a opakovateľnosti

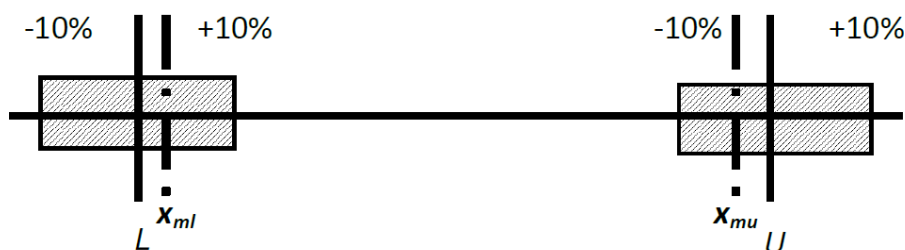
Systematické odchýlky (Bias, vychýlenie) sa musia maximálne možné redukovať využitím justovania meracieho systému alebo pomocou vypočítanej korekcie. Napriek tomu zostanú malé alebo neznáme zvyškové systematické odchýlky. Tieto odchýlky sú nekorigovateľné a predstavujú maximálne hodnoty systematických odchýlok merania v použitom intervale. Ich veľkosť je však možné odhadnúť skúmaním na jednom, prípadne viacerých etalónoch (stelesnených mierach).[4]

Opakované merania na jednom etalóne

Na stanovenie neistoty opakovateľnosti a systematickej odchýlky na jednom etalóne sa odporúča používanie Postupu 1, ktorý je popísaný v príručke Dôkaz spôsobilosti meracieho systému (Q-DAS®). Tento postup sa používa pre vyhodnotenie vhodnosti pre požadovaný účel u nových, prípadne aj modifikovaných meracích systémov pred ich prvým použitím. Pre určenie spôsobilosti, respektíve vhodnosti meracieho systému sa vypočítava index spôsobilosti.[22]

Spravidla sa uskutočňuje aspoň 25 opakovaných meraní na jednom etalóne. Etalón sa v priebehu skúšky opakovane upína a uvoľňuje a meria v rovnakej pozícii (pokiaľ nemá byť uvažovaný vplyv etalónu). Z rozptylov nameraných dát sa vypočíta výberová smerodajná odchýlka s_g , ktorá poskytuje odhad pre štandardnú neistotu u_{EVR} . Následne sa vypočíta štandardná neistota u_{Bi} . Zo získaných údajov sa na záver určia indexy spôsobilosti c_g a c_{gk} . [4]

Opakované merania na dvoch etalónoch



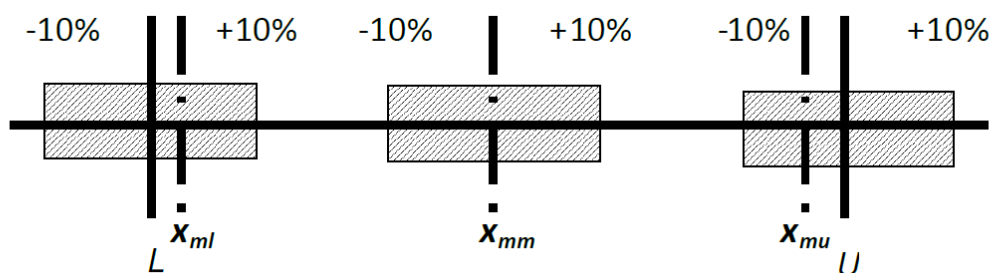
Obr. 6 Opakované merania na dvoch etalónoch[4]

Pre toto meranie je odporúčané používať také koncové mierky, ktorých pravé hodnoty (x_{ml} - pravý rozmer v pásme okolo dolnej tolerančnej medze, x_{mu} - pravý rozmer v pásme okolo

hornej tolerančnej medze) sa nachádzajú v pásme $\pm 10\%$ hodnôt dolnej (L) a hornej (U) tolerančnej medze, ako je zobrazené na obrázku 6.[4]

Na každom etalóne by sa malo uskutočniť minimálne 15 opakovaných meraní. Následne sa rovnakým postupom, ako v prípade merania jedného etalónu, stanoví pre oba etalóny hodnoty štandardných neistôt u_{EV} a u_{Bi} . Ako výsledná zložka neistoty sa v oboch prípadoch volí vyššia zo získaných hodnôt.[4]

Opakované merania na troch etalónoch



Obr. 7 Opakované merania na troch etalónoch[4]

Pre toto meranie je odporúčané používať také koncové mierky, ktorých pravé hodnoty (x_{ml} -prvý rozmer v pásme okolo dolnej tolerančnej medze, x_{mm} -prvý rozmer v pásme okolo stredu tolerancie a x_{mu} -prvý rozmer v pásme okolo hornej tolerančnej medze) sa nachádzajú v pásme $\pm 10\%$ hodnôt stredu tolerancie a dolnej (L) a hornej (U) tolerančnej medze, ako je zobrazené na obrázku 7.[4]

Na každom etalóne by sa malo uskutočniť aspoň 10 opakovaných meraní. Následne sa rovnakým postupom, ako v prípade merania jedného, či dvoch etalónov, stanoví pre každý etalón hodnoty štandardných neistôt u_{EV} a u_{Bi} . Ako výsledná zložka neistoty sa vo všetkých prípadoch volí najvyššia zo získaných hodnôt. Vzhľadom k tomu, že štandardná neistota odchýlky je v tomto prípade obsiahnutá v u_{Bi} , tak samotná $u_{LIN} = 0$. [4]

5.2.2 Linearita

Štúdia linearity slúži ku skúmaniu, ktorého cieľom je určiť, či je možné presnosť merania považovať za vhodnú v celom rozsahu merania. Táto štúdia by mala byť uskutočňovaná pred alebo spolu so štúdiou podľa Postupu 1.[22]

Pre skúmanie linearity meracieho stroja sa uskutočňujú merania na minimálne troch etalónoch. Výsledkom týchto meraní je regresná funkcia, ktorá sa použije ku korekcii meracieho systému s cieľom znížiť neistotu odchýlky linearity.[4]

Aby bolo vyšetrenie linearity korektné, musia byť splnené nasledovné predpoklady:

- zvyškové smerodajné odchýlky (smerodajné odchýlky z opakovaných meraní na etalónoch) sú vždy konzistentné,
- regresná funkcia má lineárny priebeh – regresná priamka,
- neistota pri kalibrácii etalónov by nemala presahovať 5% tolerancie,
- uskutočnené meranie má reprezentovať podmienky za akých bude merací systém používaný,

- hodnoty etalónov sa rozložia s približne rovnakými vzájomnými vzdialenosťami, aby pokryli celú prakticky významnú oblasť vyšetrovaného meracieho systému.[4]

V prípade, že sú splnené predpoklady vyšetrenia linearity, môže toto prebehnúť napríklad podľa nasledovného postupu:

- Uskutoční sa aspoň 10 opakovaných meraní na minimálnom počte 3 etalónov. Platí podmienka, že vynásobenie počtu opakovaných meraní s počtom etalónov musí tvoriť objem aspoň 30 meraní.
- Etalóny sa rovnomerne rozložia cez celú šírku tolerancie. Odporúčanými oblasťami sú medze špecifikácie, ako zobrazuje obrázok 7.
- Vytvorí sa odhad lineárnej regresnej funkcie s predpokladom, že zvyškové smerodajné odchýlky rozptylu výsledkov meraní sú konštantné.
- Analyzuje sa rozloženie reziduí chyby prispôsobenia zvyškovej smerodajnej odchýlky.
- Z rozptylov sa odhadnú zložky neistôt.
- Ak je to možné, uskutoční sa korekcia meracieho systému, ktorou budú korigované všetky merania uskutočňované pri ďalšom používaní meracieho zariadenia.[4]

5.3 Nevhodné meracie systémy

Vyhodnotenie meracieho systému ako nevhodného, označuje, že systém nie je vhodný pri dodržaní stanovenej tolerancie a neistoty kalibrácie. Postup hodnotenia vhodnosti podľa VDA 5, však aj v takomto prípade stanovuje toleranciu, pri ktorej by bol takýto systém pri daných podmienkach vhodný, je preto v špecifických prípadoch, ak je to možné, zvážiť úpravu, respektíve rozšírenie tolerancie.[4]

Všeobecne však môže stav nevhodnosti skôr svedčiť o zanesení chýb do procesu merania, prípadne väčším ovplyvnením zdrojmi variability, než bolo uvažované pri ich zohľadňovaní. Preto je v takýchto prípadoch potrebné uvažovať o uskutočnení nových meraní s použitím meracieho vybavenia s nižšou neistotou, prípadne podľa možností znížiť vplyv zdrojov variability pôsobiacich na proces merania.[4]

Vzhľadom k tomu, že v tejto diplomovej práci je posudzovaná vhodnosť súradnicového meracieho zariadenia s využitím hlavne optických senzorov, ale zároveň použitím manuálnych posuvov, je možné predpokladať, že prípadný stav nevhodnosti meracieho systému by mohol byť ovplyvnený buď nesprávnym skorigovaním alebo výraznejším účinkom zložiek ovplyvňujúcich neistotu merania, hlavne čo sa týka zložiek majúcich vplyv na optické systémy meracieho stroja.

6 MERACÍ STROJ MICRO-VU SOL 311

Predmetom hodnotenia v tejto diplomovej práci je hodnotenie vhodnosti 3D súradnicového meracieho stroja od spoločnosti Micro-Vu Corporation. Jedným z dodávateľov týchto strojov v Českej republike je spoločnosť DEOM s.r.o. (Digitální elektronicko-optická měření), ktorá so spoločnosťou Micro-Vu Corporation spolupracuje už takmer 20 rokov, avšak oficiálnym zástupcom tejto spoločnosti je v rámci Českej republiky, Slovenska a Poľska spoločnosť Control Check s.r.o., ktorá aj dodala merací stroj Micro-Vu Sol 311, Ústavu výrobních strojů, systémů a robotiky FSI VUT v Brně.[36][37]

6.1 Spoločnosť Micro-Vu Corporation

Americká spoločnosť Micro-Vu Corporation, bola založená v roku 1959 v Kalifornii. V súčasnosti má svoju pobočku pre Európu v Nemecku a pre Áziu v Číne, avšak aj vďaka oficiálnym partnerským predajcom a zástupcom dodáva svoje produkty spoločnostiam po celom svete. [34]

Micro-Vu je producentom celej škály optickým meracích strojov. V ich výrobnom portfóliu sa nachádzajú profilprojektory série Spectra a Vectra, kompaktný 2D stolový merací stroj VF7 (vhodný pre veľmi rýchlu dielenskú kontrolu predovšetkým plochých dielov), ručne ovládané kamerové systémy série Matrix a Vector, ale aj meracie stroje sérií Excel (vhodné pre meranie veľkých súčiastok a sériové meranie), zobrazené na obrázku 8a a Vertex (vhodné pre meranie samostatných kusov, ale aj pre sériové meranie), na obrázku 8b s automatizovaným riadením. Posledným typom meracích strojov v produkcii tejto spoločnosti sú optické meracie systémy série Sol, zobrazené na obrázku 8c, ktoré vyplňajú pomyselnú medzeru medzi manuálnymi a automatizovanými meracími systémami a sú vhodné predovšetkým pre kusové meranie.[35][36][37]



a) Micro-Vu Excel



b) Micro-Vu Vertex



c) Micro-Vu Sol 311

Obr. 8 Meracie stroje od spoločnosti Micro-Vu [38] [39][40]

6.2 CMM Micro-Vu Sol 311

3D súradnicový merací stroj Micro-Vu Sol 311 predstavuje hybrid na pomedzí manuálnych (využíva ručné ovládanie pohybov osí X,Y a Z) a automatizovaných meracích strojov (obsahuje motorizované, programovateľné zoomovacie šošovky objektívu, ktoré zaostrujú na meranú súčiastku). Čo sa týka zaradenia CMM v rámci konštrukčných typov podľa normy ČSN EN ISO 10360-1, jedná sa o stojanový CMM, kde je pohyb v smeroch osí X a Y zabezpečený pohybom stolu. Tento typ konštrukcie však limituje merací stroj na meranie relatívne malých súčiastok, konkrétne vo výrobcom definovanom meracom rozsahu: pre os X - 315 mm, rovnako os Y - 315 mm a pre os Z - 160 mm. Zároveň hmotnosť meranej súčiastky je limitovaná hmotnosťou 10 kg. Ďalšie parametre stroja sú zobrazené v tabuľke 4.[41]

Merací stroj Sol 311 obsahuje v najbežnejšom usporiadaní snímací optický systém s CCD kamerou s vysokým rozlíšením, programovateľné osvetlenie, presný mechanický stôl s lineárnymi snímačmi pre zaznamenávanie lineárnych zmien polohy, ktoré sú zároveň obsiahnuté aj v posuve v zvislom smere osi Z. Merací systém sa dodáva spoločne aj s počítačom vybaveným meracím programom InSpec, s ktorým je prepojený jedným USB káblom.[35][41]

Mechanické pohyby stola i CCD kamery sú realizované prevodom rotačného pohybu ručne ovládaných kľúk na lineárny pohyb jednotlivých posuvov. Vďaka vysokej presnosti prevodov umožňuje tento merací stroj meranie vo všetkých osiach rádovo až v desatinách mikrometra.[41]

Merací stroj Micro-Vu Sol 311 umiestnený na Ústave výrobných strojů, systémů a robotiky FSI VUT v Brně je zobrazený na obrázku 9.



Obr. 9 Micro-Vu Sol 311 s riadiacim PC

Tab. 4 Technické parametre stroja Micro-Vu Sol 311[35][41]

Model		Sol 311	
Serial No.		SL31101329	
Snímací systém		CCD	Farebná s vysokým rozlíšením
		zoom	Rozsah zväčšenia 19,5 x Optický 6,5x Digitálny 3x
		zobrazenie na obrazovke	Predvolené zväčšenie 20x – 360x Voliteľní zväčšenie 40x – 720x
Rozlíšenie senzoru / snímača		μm	0,1
Napájanie		120 – 230 V / 50 – 60 Hz	
osvetlenie		povrchové	Prstenec s 5 kruhmi / 8 kvadrantov / 40 buniek LED
		profilové	LED, zospodu pre zvýraznenie hrán
		osové	LED v osi objektívu CCD kamery
XY	Vedenie	-	lineárne
	Merací rozsah	mm	315 x 315
	Presnosť (MPE)	μm	4,5 + L / 150 ; L v [mm]
Z	Vedenie	-	lineárne
	Merací rozsah	mm	160
	Presnosť (MPE)	μm	2,8 + L / 100 ; L v [mm]
Hmotnosť meranej súčiastky		kg	maximálna 10 odporúčaná 3
Celkové rozmery stroja		mm	827 x 1043 x 824
Celková hmotnosť stroja		kg	132

6.2.1 InSpec Metrology Software

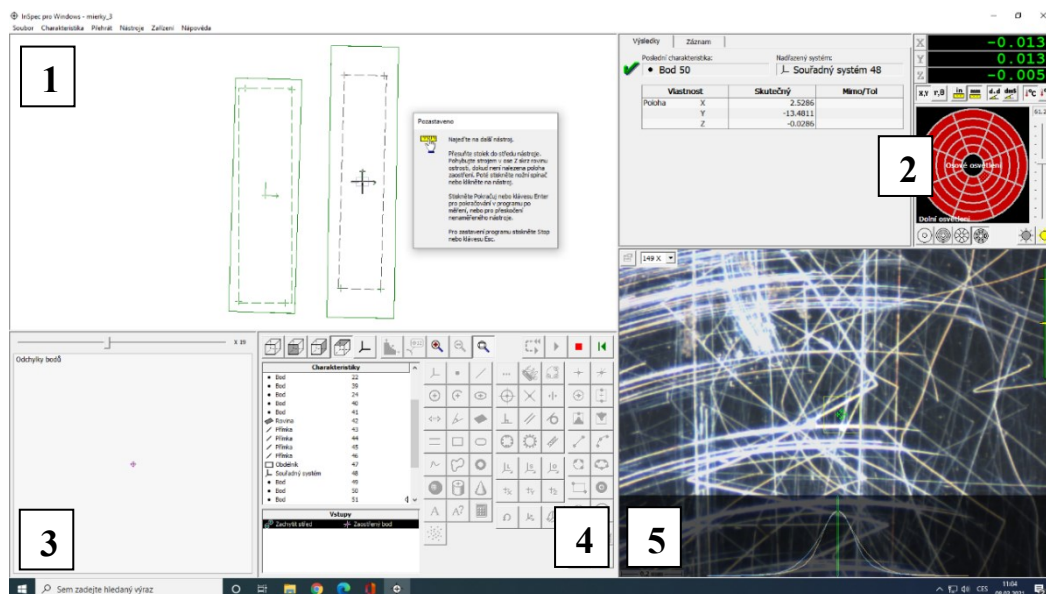
Metrologický softvér InSpec je ovládacou aplikáciou vytvorenou pre optické a multisenzorové meracie stroje. Bol navrhnutý tak, aby jeho užívateľské rozhranie, či už v prípade tvorby meracích programov, alebo až samotné uskutočňovanie opakovaných meraní s vyhodnotením, bolo pre obsluhu čo najjednoduchšie. Softvér uskutočňuje pri meraní súčastí výpočty polohy, veľkosti a tvaru ich geometrických charakteristík, ako napríklad hrán, otvorov, výšok či polomerov.[41][42]

Programovanie meracích programov prebieha viacerými spôsobmi. Najbežnejší je vytváranie programu v priebehu prvého merania na súčiastke, kedy sa postupne načítavajú geometrické charakteristiky súčasti, ktoré sa majú v priebehu merania hodnotiť. Ďalším spôsobom je importovanie CAD súborov napríklad typu DXF (.dxf), Excellon (.drl).Gerber (.gbr), či Iges (.igs) a odvodenie meracieho programu z takto načítaných geometrických charakteristík. Poslednou a veľmi efektívnou cestou je prenesenie už vytvoreného programu z iného meracieho stroja, napríklad plne automatizovaného Vertex, či Excel, na iný, napríklad čiastočne manuálny merací stroj, aký je aj predmetom skúmania v tejto diplomovej práci.

Toto je umožnené vďaka nástroju na zarovnávanie zaostrenia, ktorý je v softvéri InSpec zahrnutý.[42]

Prostredie softvéru je možné rozdeliť do piatich hlavných sekcií, viď obrázok 10:

1. Okno schémy, ktoré zobrazuje grafický záznam meranej súčiastky.
2. Sekcia s aktuálnymi stavovými informáciami o polohe stolu, jednotkách meraných charakteristík a panelom nastavenia osvetlenia (vypnutie, automatické osvetlenie, manuálne režimy osvetlenia).
3. Sekcia/okno odchýlok, obsahujúca grafické znázornenie odchýlok bodov, tvaru či tolerancií tvaru profilu, ktorá je v závislosti na type rozlíšenia monitoru počítača, buď samostatná v ľavej dolnej časti, prípadne ako súčasť sekcie 2. Príklady grafických zobrazení týchto odchýlok sú zobrazené na obrázku 11a.
4. Programové rozhranie, v ktorom sú obsiahnuté ikony jednotlivých nástrojov a zároveň samotný merací program, v podobe zoznamu charakteristík, ktoré majú byť zaznamenané v priebehu merania. Tento zoznam môže obsahovať aj poznámky, ktoré môže obsluha napomôcť v postupe pri uskutočňovaní meraní.
5. Okno kamery, ktoré buď zobrazuje aktuálne snímaný záber na pracovnej ploche, prípadne je v ňom možné otvoriť obrázok súčiastky, na ktorom sa bude vykonávať off-line meranie, teda meranie bez využitia meracieho stroju. Táto sekcia obsahuje v ľavom rohu aj ovládacie nástroje pre zobrazovaný obraz, na jeho posun alebo priblíženie či oddialenie (zoom).[42]



Obr. 10 Prostredie programu InSpec[52]

Ako bolo spomenuté vyššie v softvéri InSpec sa vytvorí, prípadne načíta merací program, ktorý je možné po uložení kedykoľvek opakovane otvárať a uskutočňovať meranie na stroji. Inšpekčný program obsahuje jednotlivé kroky merania a zároveň k nim pridružené informácie o druhu a intenzite osvetlenia a zaostrení objektívu. O typoch osvetlenia sa pojednáva v nasledujúcej kapitole.[42]

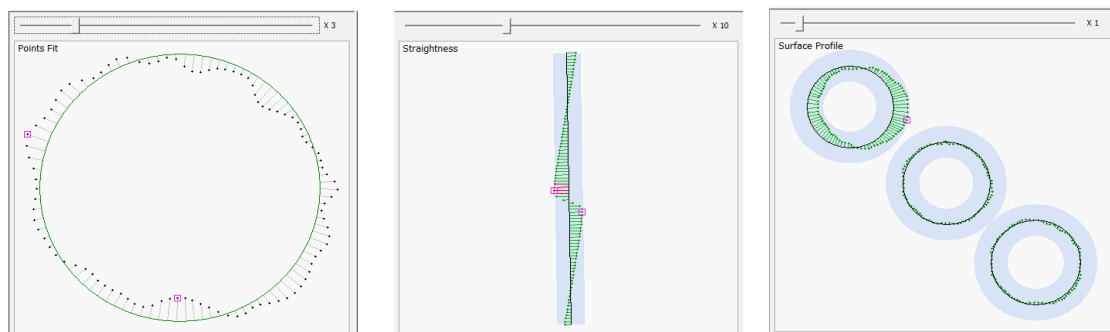
Po spustení programu a nastavení počiatočného bodu, je obslužný pracovník softvérom navádzaný pomocou šípok k posunu na ďalšie merané pozície definované v inšpekčnom programe. Pre väčšiu zrozumiteľnosť môže merací program obsahovať aj doplňujúce inštrukcie pre lepšie pochopenie jednotlivých častí postupu merania.[42]

6.2.2 Druhy osvetlenia

Súradnicový merací stroj Micro-Vu Sol 311 disponuje nasledovnými tromi druhmi osvetlenia, pričom všetky z nich sú plne programovateľné:

1. Povrchové osvetlenie, ktoré je tvorené LED diódami, umiestnenými po obvode objektívu kamery. Toto osvetlenie je možné ovládať v rôznych režimoch, buď ako celú jednu jednotku, po jednotlivých medzi-kruhoch (prstencoch), po kvadrantoch alebo tiež po segmentoch, ako zobrazuje obrázok 11b. Na prepínanie medzi režimami slúžia tlačidlá v spodnej časti okna nastavenia osvetlenia.
2. Profilové osvetlenie sa nachádza uprostred zariadenia pod plochou, na ktorú sa ukladá meraná súčiastka. Toto osvetlenie, označované aj ako spodné, je najvhodnejšie pri meraní hrán súčiastok a priechodných otvorov. Umožňuje snímačej kamere lepšiu detekciu hrán, respektíve prechodu medzi tmavou (plocha súčiastky) a bledou (okolité prostredie). U profilového osvetlenia je ale dôležitá primeraná intenzita, pretože pri veľmi silnom osvetlení budú hrany zaznamenávané kamerou, skreslené.
3. Osové osvetlenie sa nachádza vedľa objektívu a osvecuje meranú súčiastku priamo v stredovej osi objektívu, čo je užitočné pri väčších zväčšeniach, ale aj pri hľadaní plochých povrchových charakteristík.[42]

Okrem manuálneho nastavovania režimov a intenzity osvetlenia, je možné použiť funkciu automatického osvetlenia, avšak táto sa priradí len k aktuálne vybraným kanálom / riadkom meracieho programu. V mnoho prípadoch môže byť funkcia automatického osvetlenia výhodná, avšak hlavne u silno reflexívnych plôch je potrebné využitie automatického osvetlenia zvážiť.[42]

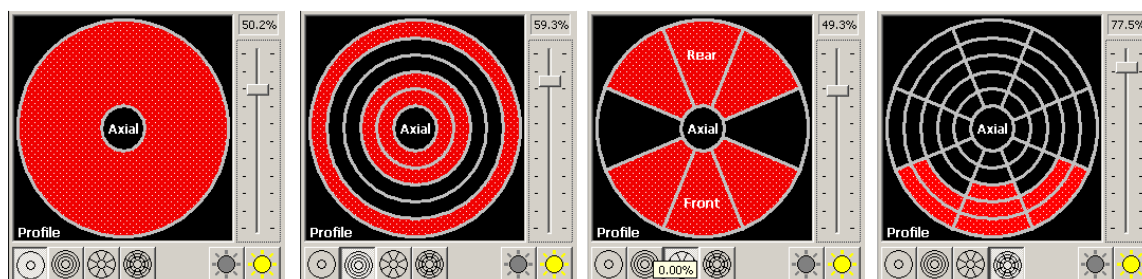


1) odchýlka bodov

2) odchýlka tvaru

3) tolerancie tvaru profilu

a) grafické znázornenie odchýlok[42]



1) celkové

2) po prstencoch

3) po kvadrantoch

4) po segmentoch

b) režimy povrchového osvetlenia[42][43]

Obr. 11 Zobrazenia v sekcii odchýlok a nastavenia osvetlenia

7 POSTUP VYHODNOTENIA VHODNOSTI

V nasledovnom texte je predstavený postup, podľa ktorého sa uskutočnilo vyhodnotenie vhodnosti 3D súradnicového meracieho stroja Micro-Vu Sol 311. Tento postup obsahuje popis použitých skúšobných prostriedkov pre uskutočnenie meraní, popis jednotlivých úkonov na získanie súboru nameraných dát a aj postup výpočtovej analýzy týchto dát. V rámci postupu výpočtovej analýzy je predstavený interaktívny protokol, postavený na základoch metodiky hodnotenia vhodnosti VDA 5.[4]

7.1 Skúšobné prostriedky

Za účelom posúdenia vhodnosti meracieho stroja boli navrhnuté merania tak, aby nimi bol overený výrobcom uvádzaný merací rozsah vo všetkých troch súradniciach. K vykonaniu meraní boli navrhnuté a po konzultácii s vedúcim diplomovej práce odporučené nasledovné skúšobné prostriedky. Pre meranie v súradniciach osí X a Y použitie kalibrovaného skleneného pravítka a pre merania v osi Z súprava koncových mierok, pričom použité koncové mierky sa neumiestňovali priamo na plochu stolu meracieho stroja, ale na podstavec, ktorým bola sklenená pomocná rovinná doštička. Účelom umiestnenia koncových mierok na sklenenú doštičku bolo, podľa možnosti, dosiahnutie čo najväčšej rovinnosti podkladovej plochy pod koncovými mierkami. Okrem týchto hmotných, boli ako skúšobné prostriedky použité aj metrologický softvér InSpec, k nemu náležiacie dva meracie programy (jeden pre meranie v osiach X a Y, druhý pre meranie v ose Z) a protokol, automaticky vyhodnocujúci vhodnosť meracieho stroja, odvodený podľa postupu hodnotenia vhodnosti metódou VDA 5, vytvorený v softvéri MS Excel.

7.1.1 Sklenené pravítko

Sklenené pravítka sú dĺžkovými meradlami s vyznačenou číselnou stupnicou v spodnej strane, vyrábanými s použitím špičkových výrobných technológií. S ohľadom na ich použitie sa vyrábajú v rôznych stupňoch presnosti, meracích rozsahoch, deleniach číselných stupníc a šírkach rysiek stupníc, hrúbkach a druhoch skla, či ergonomických úpravách rohov pravítka, a to buď hranatých, alebo zaoblených. Najzásadnejším je však rozlišovanie podľa presnosti týchto pravítok.[43]

Sklenené pravítka s nižšou presnosťou, napríklad $(1,5+2L/1000) \mu\text{m}$, kde L predstavuje meranú dĺžku v milimetroch, sú určené predovšetkým pre kontrolu presnosti zväčšenia profilprojektorov a mikroskopov, ale taktiež na meranie presnosti posuvov stolov meracích zariadení.[43]

Sklenené pravítka s vyššou presnosťou, najčastejšie $(0,5+L/1000) \mu\text{m}$, kde L predstavuje meranú dĺžku v milimetroch, tiež označované ako sklenené pravítka s nízkou teplotnou rozťažnosťou, t.j. koeficient teplotnej rozťažnosti je na úrovni $(0,00\pm 0,02) \times 10^{-6}/\text{K}$, sa používajú predovšetkým ako etalóny pri kalibrácii stupníc meradiel a meracích strojov s vysokou presnosťou.[43]

Sklenené pravítko ČMI-OI Brno

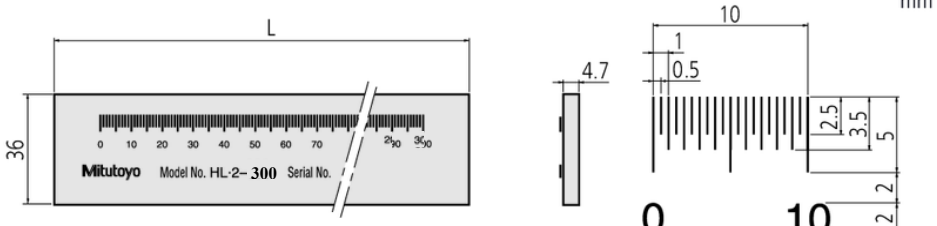
Pre uskutočňovanie meraní v tejto diplomovej práci, v rozsahu súradníc pozdĺžnych osí X a Y meraného súradnicového meracieho zariadenia, bolo použité sklenené pravítko japonského výrobcu Mitutoyo, série 182, katalógové číslo 182-523-10, modelové číslo HL2-300/D,

zapožičané a kalibrované oblastným inšpektorátom Českého metrologického ústavu ČMI-OI Brno. Vydaný kalibračný list č. 6014-KL-F0050-19 je uvedený v prílohe 4.[44]

Z hľadiska presnosti sa jedná o pravítko s vyššou presnosťou, ktoré bolo vedúcim diplomovej práce odporúčené ako vhodné k danému účelu. Rozmery a charakteristiky tohto pravítka sú uvedené v tabuľke 5.

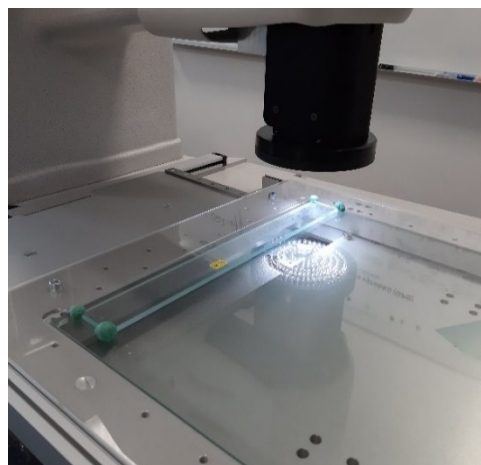
Vzhľadom k tomu, že pri lineárnych posuvoch ovládaných ručne pomocou kľuky, sa nepredpokladal vznik vyšších rýchlostí pohybu stola, bolo pravítko o stôl prichytené len pomocou guličiek vytvorených z čističu pečiatok a písacích strojov TYPUTZ, nemeckej značky Läufer, zobrazeného na obrázku 12a. Jedná sa o plastickú hmotu z prírodného kaučuku, ktorá má veľmi dobrú priľnavosť ku sklu a zabezpečí, že pravítko bude na sklenenej ploche stola meracieho stroja uchytené dostatočne pevne. Spôsob prichytenia pravítka o sklenenú dosku stola je zobrazený na obrázku 12b.

Tab. 5 Charakteristické vlastnosti a rozmery pravítka (upravené podľa [44])

Model	HL 2-300/D
Serial No.	103330
Materiál	sodné sklo
Hmotnosť	0,57 kg
Neistota merania pri teplote $(20,0 \pm 0,3)^\circ\text{C}$	$U(0,5+1 \cdot L) \mu\text{m}$ kde L predstavuje meranú dĺžku v [m]
Koeficient teplotnej rozťažnosti	$(8 \pm 1) \times 10^{-6}/\text{K}$
Celková dĺžka pravítka	330 mm
Merací rozsah	0 ÷ 300 mm
Delenie stupnice	0,5 mm
Šírka rysiek stupnice	0,05 mm
Rozmery	



a) čistič pečiatok TYPUZZ



b) spôsob prichytenia pravítka

Obr. 12 Plastická hmota a jej použitie na prichytenie pravítka

7.1.2 Koncové mierky

Norma ČSN EN ISO 3650 definuje koncové mierky, označované aj ako základné, alebo Johanssonové mierky, ako etalóny dĺžky, ktoré reprezentujú špecifický diel jednotky dĺžky medzinárodného systému jednotiek SI – metru. Koncové mierky sa vyrábajú z materiálu odolného voči opotrebeniu v niekoľkých triedach presnosti, v závislosti na zamýšľanom druhu použitia a požiadavkách na kvalitu. Každá mierka má dve rovinné a navzájom rovnobežné meracie plochy, ktoré sú vyrábané tak, aby mali schopnosť prilnúť k meracím plochám iných mierok alebo napríklad aj k pomocným rovinným doštičkám. Základom pre použitie koncových mierok ako etalónov dĺžky je ich kalibrácia, teda meranie hodnoty dĺžky v stanovenom bode meracieho povrchu mierky a následnom vyhodnotení neistoty merania.[45][46]

Koncové mierky sú najčastejšie vyrábané v tvare hranolu. Do menovitého rozmeru dĺžky 10 mm s rozmermi v priereze 9x30 mm a s menovitým rozmerom dĺžky nad 10 mm s rozmermi v priereze 9x35 mm.[21]

Výber koncovej mierky pre konkrétne použitie by mal byť odvodený od doporučení používania jednotlivých tried presností, a to:

- kalibračná trieda K (označenie na mierke K):
predovšetkým pre kalibračné laboratória na kalibráciu a nadväzovanie koncových mierok nižších stupňov sekundárnych etalónov,
- trieda 0 (označenie na mierke 0):
na presné dĺžkové meranie, kalibráciu koncových mierok z oblasti pracovných meradiel, na kalibráciu a nastavovanie meracích strojov,
- trieda 1 (označenie na mierke -):
na kalibráciu kalibrov a nastavovanie meracích strojov,
- trieda 2 (označenie na mierke =):
na bežné meranie a nastavovanie mier v strojárstve.[47]

Norma ČSN EN ISO 3650 predpisuje, že v prípade použitia interferenčnej metódy sa dĺžka koncovej mierky meria v strede meracej plochy.[45]

V prípade porovnávacieho merania sa dĺžka koncovej mierky stanovuje určením rozdielu medzi stredovou dĺžkou referenčnej koncovej mierky a mierky meranej pri algebraickom uplatnení referenčnej dĺžky. Tento dĺžkový rozdiel sa meria indikátorom (snímačom) dĺžky s vysokou rozlišovacou schopnosťou.[45]

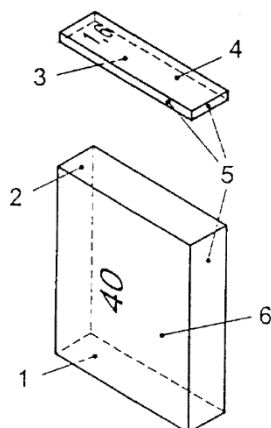
Porovnávacie meranie môže byť použité aj pre vyšetrovanie rozpätia dĺžky. Pre toto vyšetrovanie môže byť za reprezentatívny, považovaný rozdiel čítania medzi stredom a štyrmi rohmi meracej plochy, vzdialených približne 1,5 mm od bočných plôch.[45][46]

Súprava koncových mierok

Pre účely meraní v tejto diplomovej práci bola, po konzultácií a odporučení vedúcim diplomovej práce, použitá súprava koncových mierok obsahujúca koncové mierky triedy presnosti 0, od nemeckého výrobcu Karl Frank GmbH, dnešného FRANK-PTI GmbH. Koncové mierky boli kalibrované oblastným inšpektorátom Českého metrologického ústavu ČMI-OI Brno. Vydaný kalibračný list č. 6014-KL-M0055-19 je uvedený v prílohe 5.

V tabuľke 6 sú zhrnuté základné vlastnosti týchto mierok, ktoré predpisuje norma ČSN EN ISO 3650.[45]

Tab. 6 Charakteristické vlastnosti a rozmery koncových mierok[45][47]

Označenie	S1 TGL 12015/I		
Materiál	legovaná oceľ		
Presnosť pri teplote 20°C	definovaná v norme ČSN EN ISO 3650, pre jednotlivé dĺžky mierok ako dovolená odchýlka		
Koeficient teplotnej rozťažnosti	$(11,5 \pm 1,0) \times 10^{-6}/K$		
Neistota merania	$U = (0,1 + 1 \cdot L) \mu m$ kde L je meraná dĺžka v [m]		
Rozsah použitých menovitých dĺžok L	0 ÷ 100 mm		
Bočné rozmery	$0,5 \leq L < 10$	->	30 x 9 mm
	$L \geq 10$	->	35 x 9 mm
Plochy koncovej mierky			
<p>a) pre menovitú dĺžku $l_n < 6$ mm</p> <p>b) pre menovitú dĺžku $l_n \geq 6$ mm</p> <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="margin-right: 20px;"> <p>1 ľavá meracia plocha</p> <p>2 pravá meracia plocha</p> <p>3 neoznačená meracia plocha</p> <p>4 označená meracia plocha</p> <p>5 bočné plochy</p> <p>6 označená bočná plocha</p> </div>  </div>			

7.1.3 Optická pomocná rovinná doštička

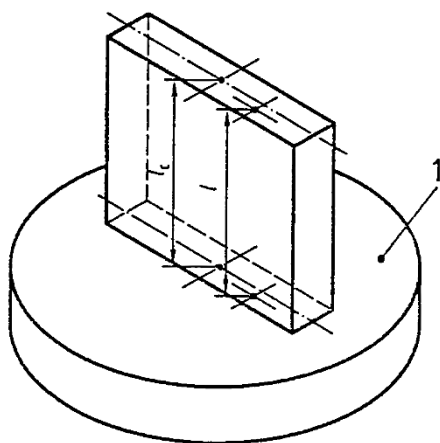
Podobne ako planparalelné optické sklíčka, ktoré sú používané na skúšky rovnobežnosti a rovinnosti reflexných lapovaných meracích plôch prevažne koncových mierok, sú aj optické pomocné rovinné doštičky kruhového prierezu. Materiál použitý na ich výrobu predstavuje najčastejšie kremenné sklo. Vďaka vysokej priľnavosti aj k predmetom z ocele a presnosti s akou sú vyrábané, tak veľmi dobre plnia úlohu podstavca pre koncové mierky v prípadoch meraní, kde je potrebná ich vyvýšená poloha voči základnému povrchu. Príklad uloženia koncovej mierky na doštičke je viditeľný na schematickom nákrese na obrázku 13a a aj na fotografií z uskutočneného merania na obrázku 13b.[50][51]

Štandardne sa tieto pomocné rovinné doštičky dodávajú v krabičke s priloženým certifikátom, čím sú opatrené proti mechanickému poškodeniu v priebehu doby uloženia, mimo času používania pri meraní.[50]

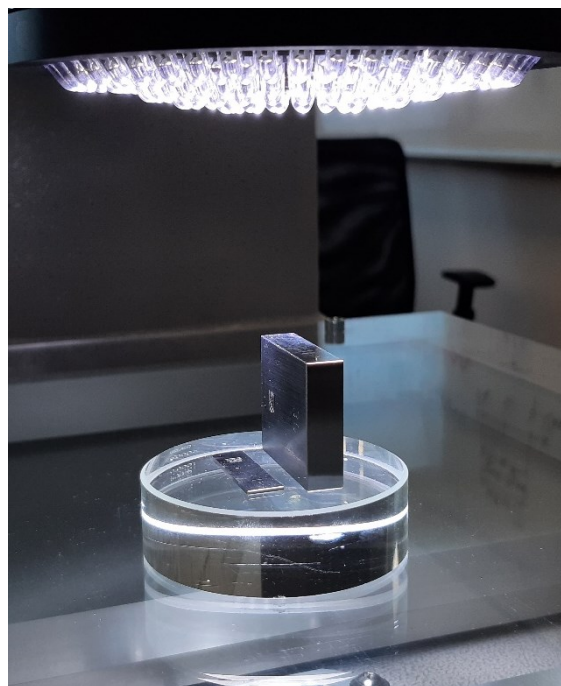
Rovnako ako u každého optického povrchu, aj u rovinných doštičiek dochádza k odrazu a lomu svetla. Časť svetelných lúčov dopadajúcich na jej horný povrch (bližší ku zdroju svetla), prejde skrz celý materiál až k jeho spodnému (zadnému) povrchu. Na tomto spodnom povrchu tak môže dôjsť k odrazu lúčov naspäť k detektoru, ktorý je však z nastavení prispôsobený na

snímanie odrazov len z horného povrchu. Tieto odrazy svetla môžu predstavovať zdroj nežiadúcich chýb merania. Eliminácia odrazov od spodného povrchu je možná úpravou tohto povrchu, namaľovaním na čierne alebo jeho vyleštením.[48]

Pre účely meraní v tejto diplomovej práci bola použitá pomocná rovinná dosťička, vo vlastníctve Ústavu výrobných strojov, systémov a robotiky FSI VUT v Brně od východonemeckej spoločnosti Carl Zeiss Jena, s priemerom $\phi 65\text{mm}$ a výškou 20mm. Chybám, ktoré by mohli byť spôsobené odrazom svetla od spodného povrchu pomocnej dosťičky, bolo predídene uskutočnením meraní s využitím odrazov svetla od povrchov dvoch koncových mierok.



- 1 – dĺžka koncovej mierky
- l_c – stredová dĺžka koncovej mierky
- 1 – pomocná rovinná dosťička



a) schéma uloženia koncovej mierky[45]

b) skutočné uloženie mierok

Obr. 13 Použitie pomocnej rovinatej dosťičky

7.1.4 Postup stanovenia ukazovateľa vhodnosti

Vhodnosť meracieho systému pre uskutočnené meracie úlohy bola hodnotená podľa výpočtového modelu vychádzajúceho z metodiky VDA 5. V rámci neho sa hodnotilo rozlíšenie a lineartita meracieho systému, následne pomocou analýzy rozptylu ANOVA boli vypočítané zložky neistoty merania a stanovená kombinovaná neistota meracieho systému. S využitím tejto hodnoty bol na záver vypočítaný ukazovateľ vhodnosti, ktorý bol následne porovnaný so stanovenou medznou hodnotou. Pre určenie ukazovateľa vhodnosti v jednotlivých meraných bodoch pre meranie v rozsahoch osí X a Y, bol aplikovaný výpočtový model pre hodnotenie opakovaných meraní na jednom etalóne, rovnako vychádzajúci z metodiky VDA 5.

Výpočtový model pre vyhodnotenie merania na celom rozsahu merania

Základ pre výpočty tvoril súbor nameraných hodnôt, pozostávajúci z referenčných hodnôt a nameraných hodnôt, hodnota tolerancie meraného rozmeru a tiež informácie o meracom stroji (rozlíšenie stroja, respektíve jeho stupnice a rozšírená neistota kalibrácie).

Ako prvé sa v rámci hodnotenia vypočítalo rozlíšenie (Resolution):

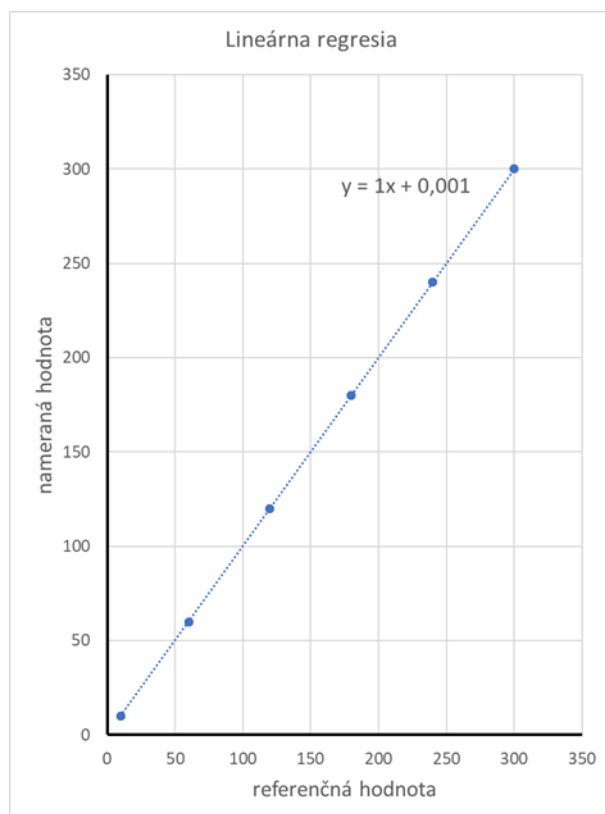
$$\%RE = \frac{RE}{TOL} \cdot 100\% \quad (2)$$

kde RE je rozlíšenie meracieho stroja,

TOL je tolerancia meraného rozmeru.

Platila podmienka $\%RE \leq 5\%$ tolerancie, ktorá predstavovala jednu z podmienok vhodnosti meracieho systému a jej splnením bolo doložené, že merací systém má vhodné rozlíšenie pre konkrétnu úlohu.

Následne sa hodnotila linearita MS. K určení výsledku tohto hodnotenia – regresnej funkcie, boli použité 2 spôsoby. Prvým spôsobom bolo zistenie rovnice regresnej funkcie z grafu, ako zobrazuje vzorový prípad z meraní na obrázku 14 a druhým využitie funkcií INTERCEPT a SLOPE v softvéri Microsoft Excel. V nasledujúcom texte je popísaný bližší rozbor jednotlivých parametrov hodnotenia linearity vychádzajúcich z analýzy ANOVA a prehľadne zobrazený na obrázku 17.



Obr. 14 Vzor zobrazenia regresnej funkcie

S využitím rovnice regresnej funkcie, bol po dosadení referenčných hodnôt stanovený lineárny model:

$$\hat{y}_{nk} = b + a \cdot \text{Reference} \quad (3)$$

kde a je koeficient regresnej funkcie,

b je koeficient regresnej funkcie,

Reference je referenčná hodnota, ktorá bola meraná.

Následne sa vypočítajú rezidua, t.j. zvyšky z lineárneho modelu:

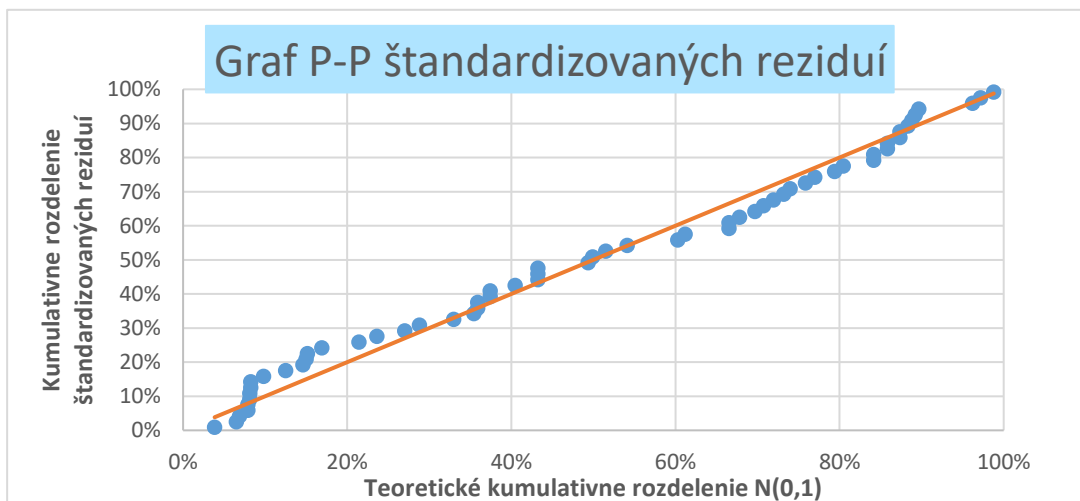
$$e_{nk} = y_{nk} - \hat{y}_{nk} \quad (4)$$

kde y_{nk} je nameraná hodnota,

\hat{y}_{nk} hodnoty generované lineárnym modelom, z rovnice (3).

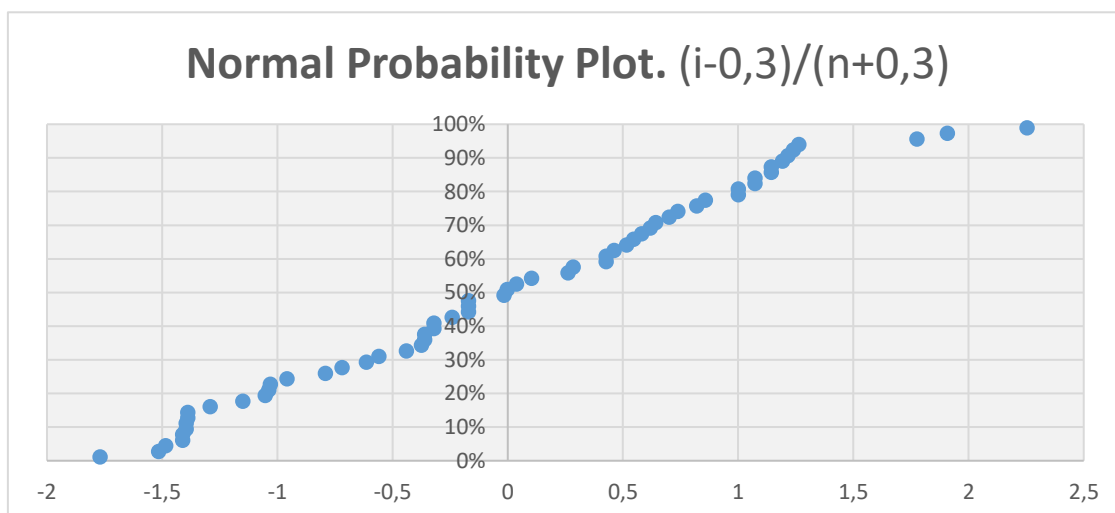
Určenie reziduí bolo jednou z možností ako overiť nezávislosť jednotlivých meraní. V prípade, že reziduá odpovedali normálnemu rozdeleniu, bolo overené, že jednotlivé merania boli nezávislé. Pre toto overenie boli zobrazované v pravdepodobnostnej sieti, viď obrázok 15.

Okrem tohto postupu bolo možné overiť normalitu aj ďalším grafickým spôsobom,



Obr. 15 Pravdepodobnostná sieť

a síce normálny pravdepodobnostný graf (N-P Plot). V prípade, ak mali dáta normálne rozdelenie, tvorili ich body v grafe približne priamku. Výskyt akýchkoľvek odchýlok od tejto priamky znamenal odchýlku od normálneho rozdelenia. N-P plot bol vytvorený nanesením usporiadaných hodnôt súboru dát na vodorovnou osu a kvantilov odpovedajúcich normálnemu rozdeleniu na zvislú osu N-P grafu. Príklad takéhoto vyšetrenia normality pomocou N-P grafu je zobrazený na obrázku 16.[53].



Obr. 16 Normálny pravdepodobnostný graf

Ďalšou stanovenou hodnotou sú priemery v podskupinách, označené ako stredná hodnota opakovaných meraní na etalóne:

$$\bar{y}_{n\bullet} = \frac{\sum_k y_{nk}}{K} \quad (5)$$

kde y_{nk} je nameraná hodnota,

K predstavuje počet opakovaných meraní.

V ďalšom kroku sa určí chyba lineárneho modelu:

$$SS_{\text{RESIDUAL}} = \text{Adj } SS_{\text{RESIDUAL}} = \sum_n \sum_k (y_{nk} - \hat{y}_{nk})^2 \quad (6)$$

kde y_{nk} sú namerané hodnoty,

\hat{y}_{nk} sú hodnoty generované lineárnym modelom.

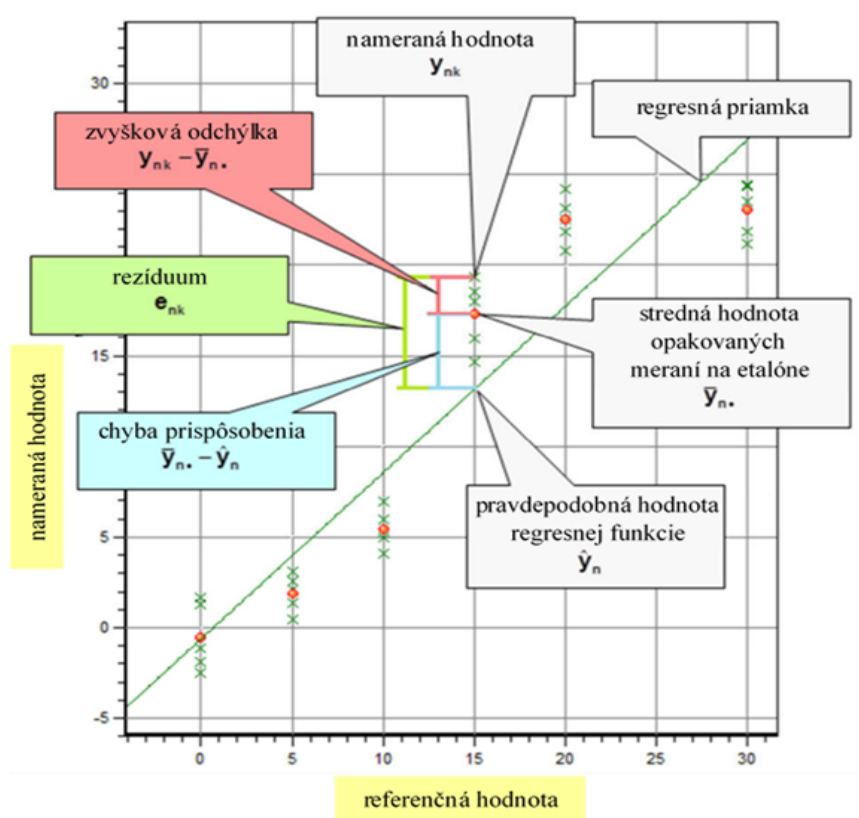
Chybu modelu sa rozdelila na dve zložky, a síce adekvátnosť modelu (7) a vlastný reziduálny súčet štvorcov (8).

Adekvátnosť modelu (Lack-of-fit):

$$SS_{\text{LIN}} = \text{Adj } SS_{\text{LIN}} = \sum_n \sum_k (\bar{y}_{n\bullet} - \hat{y}_n)^2 \quad (7)$$

kde $\bar{y}_{n\bullet}$ je stredná hodnota opakovaných meraní na etalóne,

\hat{y}_n je pravdepodobná hodnota regresnej funkcie, ktorá odpovedá hodnotám generovaným lineárnym modelom, z rovnice (3).



Obr. 17 Rozbor regresnej funkcie

Vlastný reziduálny súčet štvorcov odchýlok nameraných hodnôt a hodnôt priemerov nameraných hodnôt pre jednotlivé etalóny (Pure Error):

$$SS_{EVR} = \text{Adj } SS_{EVR} = \sum_n \sum_k (y_{nk} - \bar{y}_{n\bullet})^2 \quad (8)$$

kde y_{nk} je nameraná hodnota,

$\bar{y}_{n\bullet}$ je stredná hodnota opakovaných meraní na etalóne.

Pre obe tieto zložky bol stanovený aj počet stupňov voľnosti, ktorý je pre adekvátnosť modelu (linearita):

$$f_{LIN} = N - 2 \quad (9)$$

kde N je počet etalónov

a pre vlastný reziduálny súčet štvorcov (opakovateľnosť na etalóne):

$$f_{EVR} = N \cdot K - N = N(K - 1) \quad (10)$$

kde N je počet etalónov,

K je počet opakovaní.

Z predošlých hodnôt sa vypočíta stredná kvadratická odchýlka linearity (Lack of Fit Mean Square) MSLF:

$$MS_{LIN} = \frac{SS_{LIN}}{f_{LIN}} \quad (11)$$

kde SS_{LIN} je adekvátnosť modelu (respektíve súčet štvorcov jej odchýlok),

f_{LIN} je príslušný počet stupňov voľnosti z výpočtu (9)

a stredná kvadratická odchýlka opakovateľnosti (Pure Error Mean Square) MSPE:

$$MS_{EVR} = \frac{SS_{EVR}}{f_{EVR}} \quad (12)$$

kde SS_{EVR} je vlastný reziduálny súčet štvorcov,

f_{EVR} je príslušný počet stupňov voľnosti z výpočtu (10).

V nasledujúcom výpočte boli vypočítané zložky neistoty merania. Prvou z nich bola zložka neistoty z rozlíšenia (Resolution):

$$u_{RE} = \frac{0,5 \cdot RE}{\sqrt{3}} \quad (13)$$

kde RE je rozlíšenie meracieho stroja (v prípade vyhodnocovaného meracieho stroja sa jednalo o najmenšiu zobrazovanú hodnotu kroku).

Pre výpočet zložky neistoty z kalibrácie bola najskôr určená rozšírená neistota kalibrácie:

$$U_{cal} = 0,6 + 6 \cdot L \quad (14)$$

kde L je meraný rozmer (v prípade uskutočnených meraní – vzdialenosť).

Neistota kalibrácie (Calibration uncertainty) potom bola:

$$u_{cal} = \frac{U_{cal}}{k_{cal}} \quad (15)$$

kde U_{cal} je rozšírená neistota kalibrácie (14),

k_{cal} je koeficient rozšírenia ($k_{cal} = 2$ pre interval spoľahlivosti 95,45%).

Zložka neistoty merania z opakovateľnosti (Repeatability on reference standard):

$$u_{EVR} = \sqrt{MS_{EVR}} = \sqrt{Adj MS_{Pure Error}} \quad (16)$$

kde MS_{EVR} je stredná kvadratická odchýlka opakovateľnosti (12).

Zložka neistoty merania z linearity (Uncertainty from linearity)

$$u_{LIN} = \sqrt{MS_{LIN}} = \sqrt{Adj MS_{Lack-of-Fit}} \quad (17)$$

kde MS_{LIN} je stredná kvadratická odchýlka linearity (11).

Z jednotlivých zložiek neistoty merania bola stanovená kombinovaná neistota meracieho systému (Combined standard uncertainty of MS):

$$u_{MS} = \sqrt{u_{cal}^2 + \max\{u_{EVR}^2, u_{RE}^2\} + u_{LIN}^2} \quad (18)$$

kde u_{cal} je neistota kalibrácie (15),

u_{EVR} je zložka neistoty merania z opakovateľnosti (16),

u_{RE} je zložka neistoty z rozlíšenia (13),

u_{LIN} je zložka neistoty merania z linearity.

Ďalej sa vypočítala rozšírená neistota meracieho systému (Expanded measurement uncertainty of MS):

$$U_{MS} = 2 \cdot u_{MS} \quad (19)$$

kde u_{MS} je kombinovaná neistota meracieho systému (19).

Následne bol stanovený ukazovateľ vhodnosti:

$$Q_{MS} = \frac{2 \cdot U_{MS}}{TOL} \cdot 100\% \quad (20)$$

kde U_{MS} je rozšírená neistota meracieho systému (19)

TOL je tolerancia meraného rozmeru.

Ukazovateľ vhodnosti bol potom porovnaný so stanovenou medznou hodnotou ukazovateľa vhodnosti, v prípade tohto posúdenia to bola hodnota 15%. V prípade, že platil vzťah:

$$Q_{MS} \leq Q_{MS_max} \quad (21)$$

bol merací systém vyhodnotený ako vhodný.

Ako posledná sa počítala minimálna tolerancia, pri ktorej by bol daný merací systém ešte vhodný:

$$TQ_{LMN-UMS} = \frac{2 \cdot U_{MS}}{Q_{MS_max}} \cdot 100\% \quad (22)$$

kde U_{MS} je rozšírená neistota meracieho systému (19)

Q_{MS_max} je medzná hodnota ukazovateľa vhodnosti.

Výpočtový model pre vyhodnotenie merania po jednotlivých bodoch v rozsahu merania

Základ pre výpočty, rovnako ako vo výpočtovom modeli pre vyhodnotenie merania na celom rozsahu merania, tvoril súbor nameraných hodnôt, pozostávajúci z referenčných a nameraných hodnôt, hodnota tolerancie meraného rozmeru a tiež informácie o meracom stroji (rozlíšenie meracieho stroja, respektíve jeho stupnice a rozšírená neistota kalibrácie).

Ako prvé sa v rámci hodnotenia vypočítalo rozlíšenie (Resolution):

$$\%RE = \frac{RE}{TOL} \cdot 100\% \quad (23)$$

kde RE je rozlíšenie meracieho stroja,

TOL je tolerancia meraného rozmeru.

Platila podmienka $\%RE \leq 5\%$ tolerancie, ktorá predstavovala jednu z podmienok vhodnosti meracieho systému a jej splnením bolo doložené, že merací systém má vhodné rozlíšenie pre konkrétnu úlohu.

Oproti predošlému výpočtu, v tomto prípade nebola vyšetrovaná linearita a preto v nasledujúcom výpočte boli už priamo vypočítané zložky neistoty merania. Prvou z nich bola zložka neistoty z rozlíšenia (Resolution):

$$u_{RE} = \frac{0,5 \cdot RE}{\sqrt{3}} \quad (24)$$

kde RE je rozlíšenie meracieho stroja (v prípade vyhodnocovaného meracieho stroja sa jednalo o najmenšiu zobrazovanú hodnotu kroku).

Pre výpočet zložky neistoty z kalibrácie bola najskôr určená rozšírená neistota kalibrácie:

$$U_{cal} = 0,6 + 6 \cdot L \quad (25)$$

kde L je meraný rozmer (v prípade uskutočnených meraní – vzdialenosť).

Neistota kalibrácie (Calibration unvertainty) potom bola:

$$u_{cal} = \frac{U_{cal}}{k_{cal}} \quad (26)$$

kde U_{cal} je rozšírená neistota kalibrácie (24),

k_{cal} je koeficient rozšírenia ($k_{cal} = 2$ pre interval spoľahlivosti 95,45%).

Zložka neistoty merania z opakovateľnosti (Repeatability on reference standard) sa určila podľa vzťahu:

$$u_{EVR} = \sqrt{\frac{1}{K-1} \cdot \sum_k (y_{nk} - \bar{y}_{nk})^2} \quad (27)$$

kde K je počet opakovaných meraní,

y_{nk} je nameraná hodnota,

\bar{y}_{nk} je stredná hodnota nameraných hodnôt.

Poslednou určenou bola zložka neistoty bias (vychýlenia) (Uncertainty from bias):

$$u_{BI} = \frac{|\bar{y}_{nk} - \text{Reference}|}{\sqrt{3}} \quad (28)$$

kde \bar{y}_{nk} je stredná hodnota nameraných hodnôt,

Reference je referenčná hodnota, ktorá bola meraná.

Z jednotlivých zložiek neistoty merania bola stanovená kombinovaná neistota meracieho systému (Combined standard uncertainty of MS):

$$u_{MS} = \sqrt{u_{cal}^2 + \max\{u_{EVR}^2, u_{RE}^2\} + u_{LIN}^2 + u_{BI}^2} \quad (29)$$

kde u_{cal} je neistota kalibrácie (26),

u_{EVR} je zložka neistoty merania z opakovateľnosti (27),

u_{RE} je zložka neistoty z rozlíšenia (24),

u_{LIN} je zložka neistoty merania z linearity, v tomto prípade ale $u_{LIN} = 0$, pretože linearita bola obsiahnutá v zložke u_{BI}

u_{BI} je zložka neistoty bias (vychýlenie).

Ďalej sa vypočítala rozšírená neistota meracieho systému (Expanded measurement uncertainty of MS):

$$U_{MS} = 2 \cdot u_{MS} \quad (30)$$

kde u_{MS} je kombinovaná neistota meracieho systému (29).

Následne bol stanovený ukazovateľ vhodnosti:

$$Q_{MS} = \frac{2 \cdot U_{MS}}{TOL} \cdot 100\% \quad (31)$$

kde U_{MS} je rozšírená neistota meracieho systému (30)

TOL je tolerancia meraného rozmeru.

Ukazovateľ vhodnosti bol potom porovnaný so stanovenou medznou hodnotou ukazovateľa vhodnosti, v prípade tohto posúdenia to bola hodnota 15%. V prípade, že platil vzťah:

$$Q_{MS} \leq Q_{MS_max} \quad (32)$$

bol merací systém vyhodnotený ako vhodný.

Ako posledná sa počítala minimálna tolerancia, pri ktorej by bol daný merací systém ešte vhodný:

$$TQ_{LMN-UMS} = \frac{2 \cdot U_{MS}}{Q_{MS_max}} \cdot 100\% \quad (33)$$

kde U_{MS} je rozšírená neistota meracieho systému (30)

Q_{MS_max} je medzná hodnota ukazovateľa vhodnosti.

Protokol s automatickou analýzou nameraných dát

Za účelom zjednodušenia a zrýchlenia výpočtovej časti posúdenia vhodnosti meracieho stroja, podľa výpočtového modelu pre vyhodnotenie merania na celom rozsahu merania, zároveň aj prehľadného zobrazenia dosiahnutých výsledkov, bol vytvorený vyhodnocovací protokol. K jeho tvorbe bol použitý softvér Microsoft Excel.

Celkovo je vytvorený súbor zložený z troch hárkov. Prvý hárk predstavuje zobrazovaciu časť, ktorou je samotný Protokol o vyšetrení vhodnosti meracieho systému. Druhý hárk obsahuje výpočtovú časť, teda všetky výpočty ktoré boli popísané v predošlom texte a v treťom hárku je zostavený postup pre vyšetrenie linearity meracieho systému spolu s grafickým zobrazením reziduí v pravdepodobnostnej sieti a normálny pravdepodobnostný graf (N-P Plot).

Protokol, ktorý je hlavným výstupom z vytvoreného vyhodnocovacieho súboru, je možné rozdeliť do štyroch častí. Vzor tohto protokolu je zobrazený na obrázku 18 a celý výpočtový súbor Protokol VZOR.xlsx, z programu Microsoft Excel, je súčasťou príloh tejto práce, ako príloha č 1.

Prvá časť obsahuje základné informácie, jednak o meradle, ale aj o jeho umiestnení a podmienkach prostredia pri meraní (t.j. teplota, atmosférický tlak a relatívna vlhkosť vzduchu).

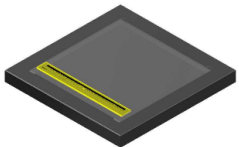
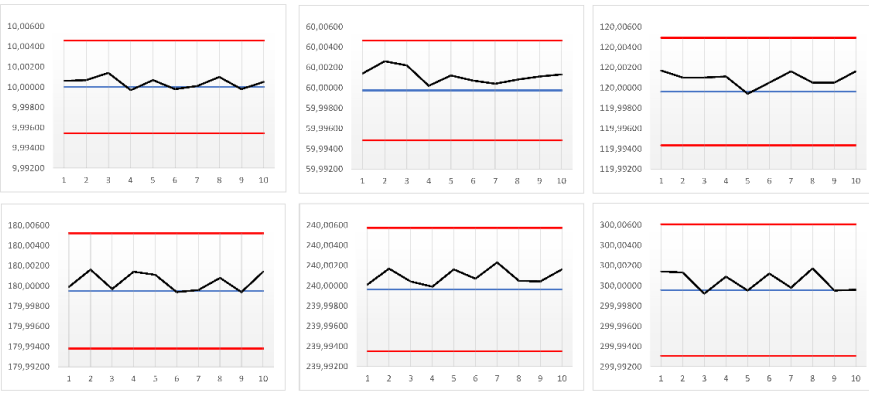
Druhá časť protokolu obsahuje miesto pre vloženie obrázku so schematickým zobrazením merania, presnejšie informácie o meraní, ako napríklad rozlíšenie meracieho stroja, toleranciu meraného rozmeru alebo predpis pre rozšírenú neistotu kalibrácie, ale predovšetkým tabuľku pre vloženie nameraných hodnôt. Po vložení všetkých zdrojových hodnôt, sa v rámci tejto časti protokolu v grafickom zobrazení vývoja nameraných hodnôt, zobrazia hodnoty v jednotlivých bodoch merania spolu s najväčšou dovolenou chybou merania (MPE). Toto zobrazenie je rýchlou a prehľadnou formou zobrazenia, či namerané hodnoty boli v medziach MPE, alebo ich prekročili.

Tretia časť protokolu je zobrazením vypočítaných výsledkov. Prehľadne vo forme tabuľky, zobrazuje najdôležitejšie z nich, predovšetkým ukazovateľ vhodnosti, ktorý je prednastavený tak, aby sa hodnota zobrazila červenou farbou po prekročení medznej hodnoty tohto ukazovateľa (ako medzná bola po vzore hodnotenia metódou VDA 5 nastavená hodnota 15%, avšak túto je možné meniť podľa požiadaviek na merací systém). V prípade, že hodnota ukazovateľa vhodnosti neprekročí medznú hodnotu, zostáva v čiernej farbe, ako ostatné výsledky. Rovnaký prístup zmeny farby po prekročení limitnej hodnoty je použitý aj v prípade rozlíšenia, kde ku zmene farby na červenú dôjde v prípade, že hodnota %RE prekročí hodnotu 5%. Popri týchto hodnotách je zobrazená aj hodnota minimálnej tolerancie, teda údaj, ktorý určuje pri akej tolerancii by bol ešte merací systém pre stanovené podmienky merania vhodný.

Ďalšími zobrazenými výsledkami sú potom ešte hodnoty jednotlivých zložiek neistoty merania, vďaka čomu je možné efektívne analyzovať, ktorá zložka má na výslednú neistotu merania najväčší vplyv a je potrebné tento jej vplyv redukovať.

Posledná štvrtá časť protokolu je miestom pre zhodnotenie výsledkov merania. Obsahuje vzorový text, obsahujúci stručné zhodnotenie vhodnosti meracieho systému, avšak ten si môže používateľ protokolu ľubovoľne upraviť podľa potreby.



Protokol o vyšetrení vhodnosti meracieho systému podľa VDA 5																																							
Užívateľ meradia: FSI VUT v Brně Názov meradia: Micro-Vu Sol 311 Evidenčné číslo meradia: 321978 Miesto merania: Brno Dátum merania: 11.3.2021		Podmienky pri meraní: Teplota: 25,4 °C Tlak: 969,5 hPa Vlhkosť: 16,5 % RH		Schéma merania: 																																			
rozlíšenie prístroja / stupnice: 0,10 μm tolerancia meraného rozmery: 20,00 μm rozšírená neistota kalibrácie: 0,6 + L, + 6 μm meraná dĺžka (L): 0,2999996 m najväčšia dovolená chyba merania (MPE): 4,5 + L, / 150 μm				Pozícia pravítka: X: 0 mm Y: 20 mm																																			
Namerané hodnoty:																																							
	Xn	Yn1	Yn2	Yn3	Yn4	Yn5	Yn6	Yn7	Yn8	Yn9	Yn10																												
1	10,00000	10,00006	10,00007	10,00014	9,99997	10,00007	9,99998	10,00001	10,00010	9,99998	10,00005																												
2	59,99972	60,00014	60,00026	60,00022	60,00002	60,00012	60,00007	60,00004	60,00008	60,00011	60,00013																												
3	119,99962	120,00017	120,00010	120,00010	120,00011	119,99994	120,00005	120,00016	120,00005	120,00005	120,00016																												
4	179,99951	179,99999	180,00016	179,99997	180,00014	180,00011	179,99994	179,99996	180,00008	179,99994	180,00014																												
5	239,99962	240,00001	240,00017	240,00004	239,99999	240,00016	240,00007	240,00023	240,00005	240,00004	240,00016																												
6	299,99957	300,00014	300,00013	299,99992	300,00009	299,99995	300,00012	299,99998	300,00017	299,99995	299,99996																												
Grafické znázornenie vývoja nameraných hodnôt:																																							
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> Xn - referenčné hodnoty (mm) Yn - merané hodnoty (mm) </div>																																							
																																							
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tbody> <tr> <td>Rozlíšenie</td> <td>RE</td> <td>0,0001</td> <td>mm</td> </tr> <tr> <td>Tolerancia</td> <td>TOL</td> <td>0,0200</td> <td>mm</td> </tr> <tr> <td>Rozšírená neistota kalibrácie, kCAI = 2</td> <td>Ucal</td> <td>0,0024</td> <td>mm</td> </tr> <tr> <td>Stredná kvadratická odchýlka opakovateľnosti (Pure Error Mean Square) MSPF</td> <td>MS_{PE}</td> <td>0,00000063</td> <td>mm²</td> </tr> <tr> <td>Stredná kvadratická odchýlka linearity (Lack of Fit Mean Square) MSLF</td> <td>MS_{LIN}</td> <td>0,00000179</td> <td>mm²</td> </tr> </tbody> </table>												Rozlíšenie	RE	0,0001	mm	Tolerancia	TOL	0,0200	mm	Rozšírená neistota kalibrácie, kCAI = 2	Ucal	0,0024	mm	Stredná kvadratická odchýlka opakovateľnosti (Pure Error Mean Square) MSPF	MS _{PE}	0,00000063	mm ²	Stredná kvadratická odchýlka linearity (Lack of Fit Mean Square) MSLF	MS _{LIN}	0,00000179	mm ²								
Rozlíšenie	RE	0,0001	mm																																				
Tolerancia	TOL	0,0200	mm																																				
Rozšírená neistota kalibrácie, kCAI = 2	Ucal	0,0024	mm																																				
Stredná kvadratická odchýlka opakovateľnosti (Pure Error Mean Square) MSPF	MS _{PE}	0,00000063	mm ²																																				
Stredná kvadratická odchýlka linearity (Lack of Fit Mean Square) MSLF	MS _{LIN}	0,00000179	mm ²																																				
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="4">Zložky neistoty (uncertainty components)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>rozlíšenie (Resolution)</td> <td>u_{RE}</td> <td>0,00002887</td> <td>mm</td> </tr> <tr> <td>neistota kalibrácie (Calibration uncertainty)</td> <td>u_{cal} (k=2)</td> <td>0,00012</td> <td>mm</td> </tr> <tr> <td>opakovateľnosť (Repeatability on reference standard)</td> <td>u_{PE}</td> <td>0,00008</td> <td>mm</td> </tr> <tr> <td>neistota linearity (Uncertainty from linearity)</td> <td>u_{LIN}</td> <td>0,00013</td> <td>mm</td> </tr> <tr> <td>kombinovaná neistota meracieho systému (Measurement system)</td> <td>u_{MS}</td> <td>0,00020</td> <td>mm</td> </tr> </tbody> </table>												Zložky neistoty (uncertainty components)				rozlíšenie (Resolution)	u _{RE}	0,00002887	mm	neistota kalibrácie (Calibration uncertainty)	u _{cal} (k=2)	0,00012	mm	opakovateľnosť (Repeatability on reference standard)	u _{PE}	0,00008	mm	neistota linearity (Uncertainty from linearity)	u _{LIN}	0,00013	mm	kombinovaná neistota meracieho systému (Measurement system)	u _{MS}	0,00020	mm				
Zložky neistoty (uncertainty components)																																							
rozlíšenie (Resolution)	u _{RE}	0,00002887	mm																																				
neistota kalibrácie (Calibration uncertainty)	u _{cal} (k=2)	0,00012	mm																																				
opakovateľnosť (Repeatability on reference standard)	u _{PE}	0,00008	mm																																				
neistota linearity (Uncertainty from linearity)	u _{LIN}	0,00013	mm																																				
kombinovaná neistota meracieho systému (Measurement system)	u _{MS}	0,00020	mm																																				
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tbody> <tr> <td>tolerancia T (Tolerance)</td> <td>TOL</td> <td>0,0200</td> <td>mm</td> </tr> <tr> <td>rozlíšenie (Resolution)</td> <td>%R_H</td> <td>0,5000</td> <td>%</td> </tr> <tr> <td>kombinovaná neistota meracieho systému (Combined standard uncertainty of MS)</td> <td>u_{MS}</td> <td>0,00020</td> <td>mm</td> </tr> <tr> <td>rozšírená neistota meracieho systému (Expanded measurement uncertainty of MS)</td> <td>U_{MS} (k=2)</td> <td>0,00039</td> <td>mm</td> </tr> <tr> <td>medzná hodnota ukazovateľa vhodnosti</td> <td>Q_{MSmax}</td> <td>15,00</td> <td>%</td> </tr> <tr> <td>ukazovateľ vhodnosti</td> <td>Q_{MS}</td> <td>39,33</td> <td>%</td> </tr> <tr> <td>minimálna tolerancia</td> <td>TOL_{MIN-UMS}</td> <td>0,052434</td> <td>mm</td> </tr> </tbody> </table>												tolerancia T (Tolerance)	TOL	0,0200	mm	rozlíšenie (Resolution)	%R _H	0,5000	%	kombinovaná neistota meracieho systému (Combined standard uncertainty of MS)	u _{MS}	0,00020	mm	rozšírená neistota meracieho systému (Expanded measurement uncertainty of MS)	U _{MS} (k=2)	0,00039	mm	medzná hodnota ukazovateľa vhodnosti	Q _{MSmax}	15,00	%	ukazovateľ vhodnosti	Q _{MS}	39,33	%	minimálna tolerancia	TOL _{MIN-UMS}	0,052434	mm
tolerancia T (Tolerance)	TOL	0,0200	mm																																				
rozlíšenie (Resolution)	%R _H	0,5000	%																																				
kombinovaná neistota meracieho systému (Combined standard uncertainty of MS)	u _{MS}	0,00020	mm																																				
rozšírená neistota meracieho systému (Expanded measurement uncertainty of MS)	U _{MS} (k=2)	0,00039	mm																																				
medzná hodnota ukazovateľa vhodnosti	Q _{MSmax}	15,00	%																																				
ukazovateľ vhodnosti	Q _{MS}	39,33	%																																				
minimálna tolerancia	TOL _{MIN-UMS}	0,052434	mm																																				
Zhodnotenie:																																							
Merací systém má vyhovujúce rozlíšenie (≤ 5% tolerancie), presnejšie 0,5% pre toleranciu 20 μm. Pre zadanú toleranciu 20 μm (a neistotu kalibrácie 1,2 μm) nie je merací systém vhodný (ukazovateľ vhodnosti QMS je 39,33%). Aby bol merací systém vhodný, musí byť tolerancia väčšia ako 52,4 μm.																																							

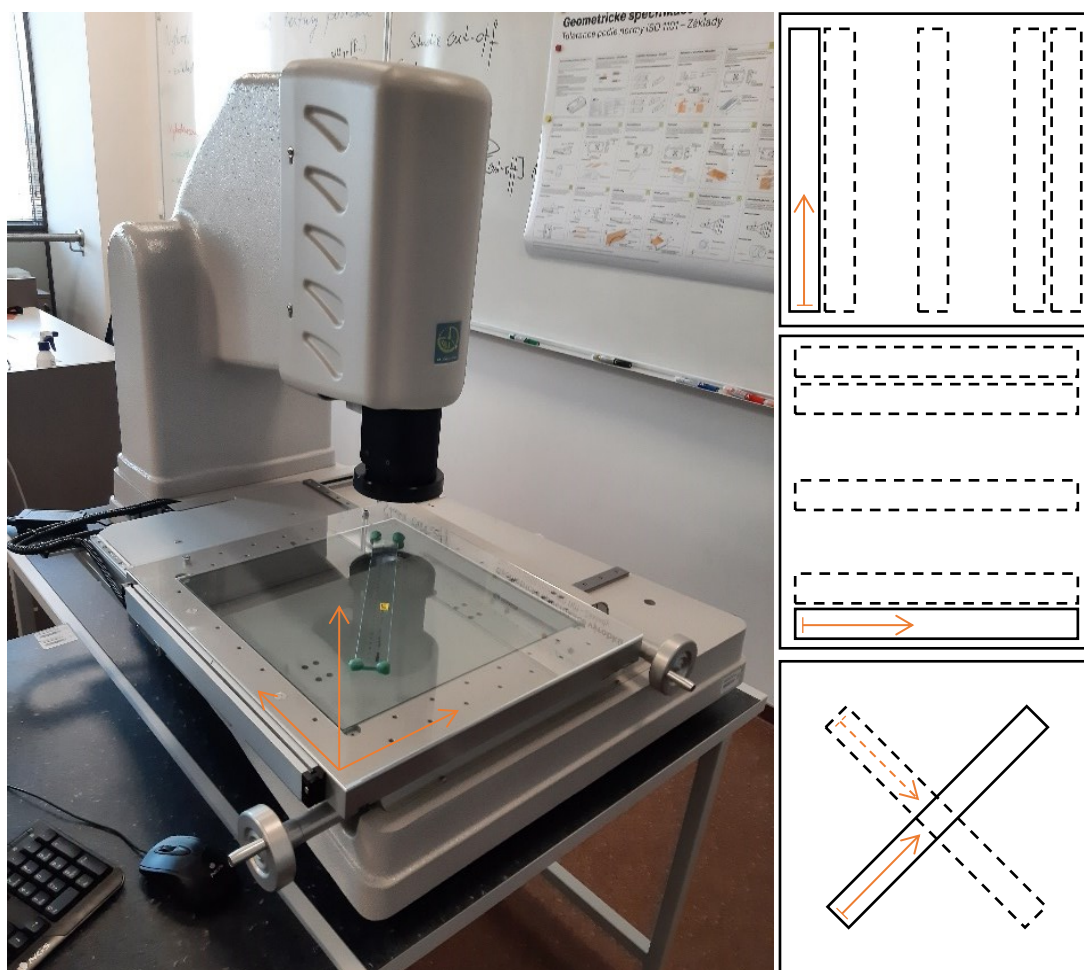
Obr. 18 Vzor vyhodnocovacieho protokolu

7.2 Postup merania s využitím skleneného pravítka

Pre účely posúdenia vhodnosti meracieho stroja v rozsahu osí X a Y bol navrhnutý nasledujúci prístup. Zvolené sklenené pravítko sa postupne umiestnilo a upevnilo v piatich polohách, z pohľadu obsluhy stojacej pred meracím strojom, v smere zľava doprava, ako je zobrazené v schematickom nákrese v pravej hornej časti obrázku 19. Jednotlivé polohy, dve krajné na oboch stranách a jedna poloha uprostred, boli zvolené na základe predpokladu, že v okrajových častiach pracovného stola, by na základe konštrukčného riešenia stroja, mohlo dochádzať k väčším odchýlkam nameraných hodnôt, než v centrálnej časti. Meranie v tomto prípade prebehlo pozdĺž osi Y a celkovo sa uskutočnilo 10 opakovaných meraní.

Následne sa uskutočnil rovnaký postup aj pozdĺž osi X. V tomto prípade sa sklenené pravítko umiestňovalo, z pohľadu obsluhy stojacej pred meracím strojom, v smere od obsluhy k stojanu meracieho stroja, chápané ako zdola smerom hore, ako je zobrazené v druhom schematickom nákrese na obrázku 19. Aj v tomto prípade bolo uskutočnených 10 opakovaných meraní v piatich pozíciách pravítka na pracovnom stole meracieho stroja.

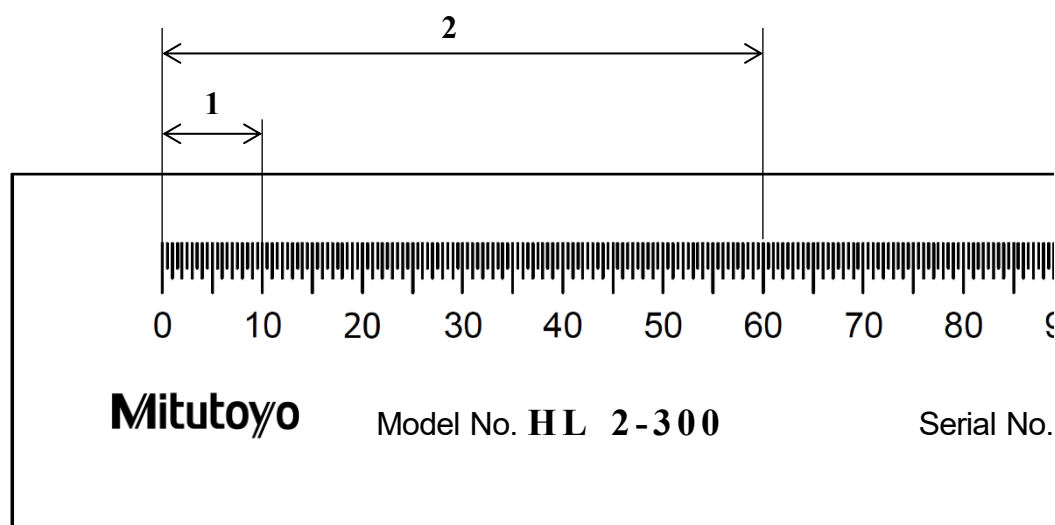
Ako posledné boli uskutočnené kontrolné merania v diagonálnych smeroch XY. Smery merania boli v týchto polohách určené: prvá z ľavého dolného rohu k pravému hornému a druhá z ľavého horného rohu stola k pravému dolnému. Obe polohy sú zobrazené v schematickom nákrese na obrázku 19. Vzhľadom k tomu, že toto meranie bolo považované len za overovacie, uskutočnilo sa 10 opakovaných meraní len v týchto dvoch pozíciách pravítka voči stolu meracieho stroja.



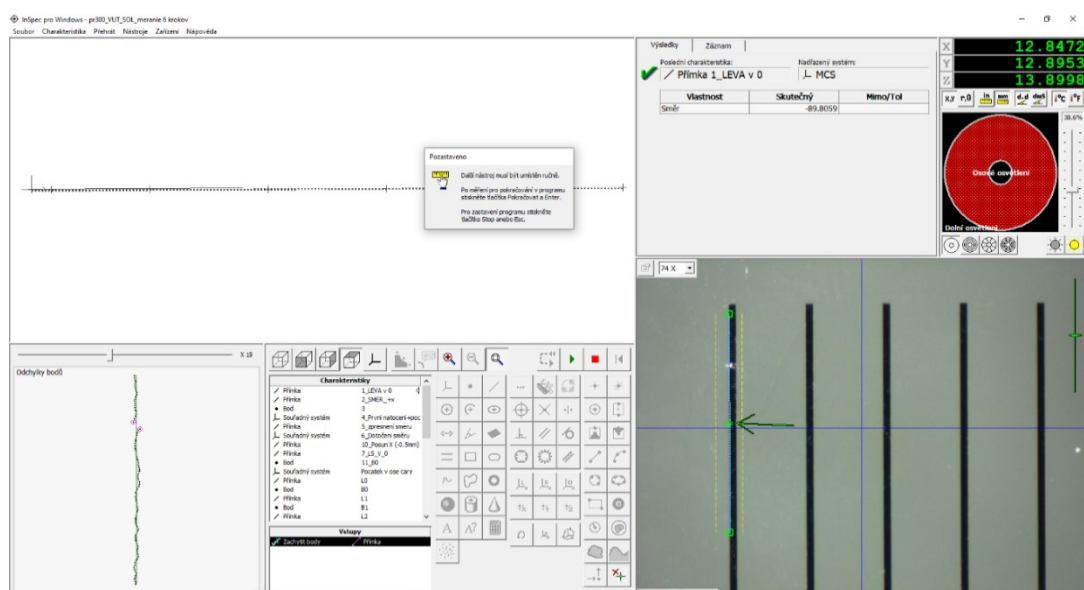
Obr. 19 Súradnicový systém meracieho stroja a schematické nákresy meracích polôh

Pre všetky opakované merania v jednotlivých polohách pravítka, boli stanovené tzv. kroky. Cieľom bolo zaznamenať v optimálnom množstve meraní, hodnoty v celom meracom rozsahu, ktorý bol odvodený od dĺžky meraného kalibrovaného skleneného pravítka. S prihliadnutím na tieto ciele bolo stanovených 6 krokov, pričom prvý bol krátky krok s dĺžkou 10 mm a následné dlhé kroky, ktoré predstavujú násobky hodnoty 60 mm, teda 60 mm, 120 mm, 180 mm, 240 mm a 300 mm. Pre názornosť sú prvé dva kroky zobrazené na obrázku 20a.

Dĺžky týchto krokov boli merané zameraním na ľavú hranu rysiek, ako je zobrazené v pravej dolnej časti na obrázku 20b, vzhľadom k tomu, že tento postup je používaný aj oblastným inšpektorátom Českého metrologického ústavu ČMI-OI Brno. Kalibrácia použitého skleneného pravítka prebehla tiež rovnakým spôsobom.



a) meracie kroky na sklenenom pravítku[upravené podľa 44]



b) zameriavanie na ľavú hranu rysky[52]

Obr. 20 Dĺžka a zameranie krokov na sklenenom pravítku

7.2.1 Merací program

Po zvolení poloh pravítka na pracovnom stole, meracích krokoch pre jednotlivé merania a zvolenom zameriavaní na ľavú hranu rysiek pravítka, bol vytvorený merací program v metrologickom softvéri InSpec. Tento program vznikol modifikáciou pôvodného programu, ktorý bol vytvorený na Ústave výrobních strojů, systémů a robotiky FSI VUT v Brně, za účelom prvotných meraní na tomto meracom stroji. Tento merací program (pr300_VUT_SOL_meranie 6 krokov) je súčasťou príloh tejto práce, ako príloha č. 6.

Záznam jednotlivých charakteristík v meracom programe z programového rozhrania softvéru InSpec je zobrazený na obrázku 21.

Charakteristiky		
/ Přímka	1_LEVA v 0	manuálně (obsluhou) vyznačená přímka na ľavej strane prvej rysky, druhá priamka cez 5 rysiek pre určenie smeru, v ktorom sa meralo a podporné funkcie pred začatím merania
/ Přímka	2_SMER_+x	
• Bod	3	
└ Souřadný systém	4_První natocení+pocatek	
/ Přímka	5_zpresnění smeru	
└ Souřadný systém	6_Dotočení směru	
/ Přímka	10_Posun X (-0.5mm)	jednotlivé body a priamky, v ktorých prebieha meranie, potrebný len posun snímacieho systému na konkrétne miesto a potvrdenie danej polohy
/ Přímka	7_LS_V_0	
• Bod	11_B0	
└ Souřadný systém	Pocatek v ose cary	
/ Přímka	L0	
• Bod	B0	
/ Přímka	L1	
• Bod	B1	
/ Přímka	L2	
• Bod	B2	
/ Přímka	L4	
• Bod	B4	
/ Přímka	L6	
• Bod	B6	
/ Přímka	L8	
• Bod	B8	
/ Přímka	L10	
• Bod	B10	
↔ Vzdálenost	DÉLKA B0_B1	výsledné namerané hodnoty vzdialeností medzi bodmi na ryskách a priamkami na ryskách
↔ Vzdálenost	DÉLKA B0_B2	
↔ Vzdálenost	DÉLKA B0_B4	
↔ Vzdálenost	DÉLKA B0_B6	
↔ Vzdálenost	DÉLKA B0_B8	
↔ Vzdálenost	DÉLKA B0_B10	
↔ Vzdálenost	DÉLKA L0_L1	
↔ Vzdálenost	DÉLKA L0_L2	
↔ Vzdálenost	DÉLKA L0_L4	
↔ Vzdálenost	DÉLKA L0_L6	
↔ Vzdálenost	DÉLKA L0_L8	
↔ Vzdálenost	DÉLKA L0_L10	

Obr. 21 Charakteristiky meracieho programu[52]

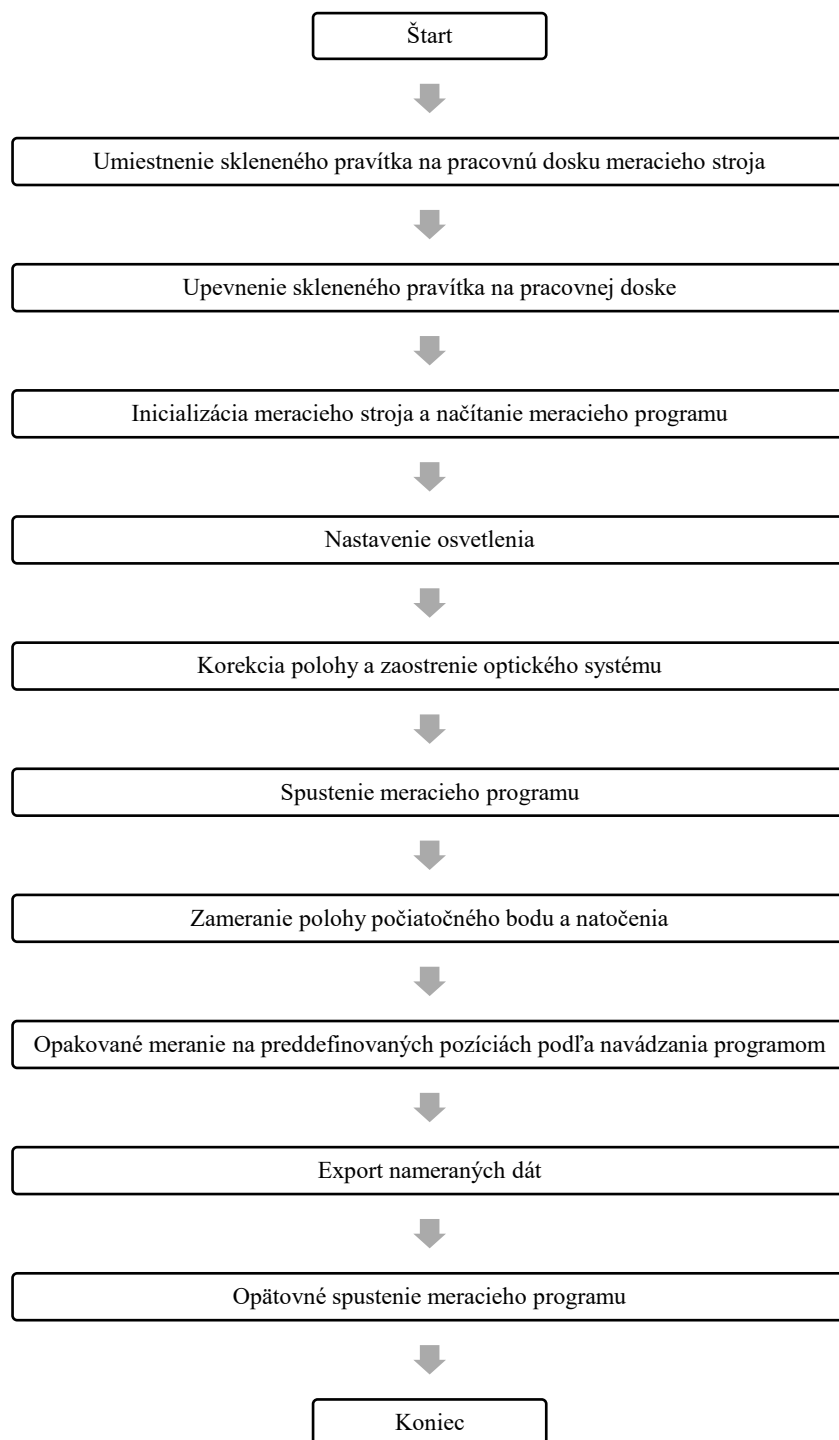
7.2.2 Postup merania po jednotlivých krokoch

Technické uskutočnenie jednotlivých meraní pozostávalo z viacerých krokov. Prvé meranie sa, oproti ďalším opakovaným, líšilo v prvých piatich krokoch, ktoré bolo potrebné uskutočniť len na začiatku a pri ďalších meraniach už neopakovať, z dôvodu zachovania rovnakých podmienok pri všetkých opakovaných meraniach v danej polohe pravítka. Samotné kroky boli nasledujúce:

- Umiestnenie skleneného pravítka na pracovnú dosku meracieho stroja
Sklenené pravítko sa pred umiestnením na pracovnú dosku očistilo, rovnako aj samotná pracovná doska a následne bolo pravítko umiestnené do polohy, v ktorej malo byť merané.
- Upevnenie skleneného pravítka na pracovnej doske
Po kontrole správnej polohy pravítka, bolo pripevnené pomocou guľčiek z plastickej hmoty TYPUTZ.
- Inicializácia meracieho stroja a načítanie meracieho programu
V tomto kroku sa spustí merací stroj a softvér InSpec. Program obsluhu vyzve k inicializácii meracieho stroja, ktorá prebieha manuálnym posuvom v smere všetkých osí meracieho stroja pomocou manuálnych klúč, prechodom cez referenčné značky. Po tomto úkone dôjde ku kalibrácii rozsahu meracieho stroja a dokončeniu jeho prípravy pred meraním.
- Nastavenie osvetlenia
Nastavenie osvetlenia bolo možné v meracom programe preddefinovať. V prípade, že preddefinované nebolo, bolo potrebné manuálne nastavenie druhu a intenzity osvetlenia, ktoré sa pri meraní použilo. V takom prípade bolo nutné nastavovať druh i intenzitu osvetlenia v každej meranej pozícii.
- Korekcia polohy a zaostrenie optického systému
Pomocou manuálnych posuvov bola zameraná oblasť, v ktorej sa nachádzala prvá meraná pozícia a pomocou posuvu v smere osi Z bolo uskutočnené zaostrenie optického systému na prvý rysku pravítka.
- Spustenie meracieho programu
Merací program bol spustený pomocou tlačidla: Spustit.
- Zameranie polohy počiatočného bodu a natočenia
Podľa navádzania programom bolo uskutočnené zameranie polohy počiatočného bodu a priamky manuálnym vyznačením priamky v meracom programe a ďalších bodov podľa preddefinovaných charakteristík programu.
- Opakované meranie na preddefinovaných pozíciách podľa navádzania programom
Po zameraní počiatočných bodov a priamok, merací stroj identifikoval polohu pravítka, zväčšil zaostrenie na rysky stupnice pravítka a začal navádzať pomocou orientačnej šípky obsluhu k ďalším meraným bodom, respektíve priamkam. Po presunutí do meracej pozície bolo meranie v danom mieste potvrdené buď nášľapným tlačidlom, prípadne klávesou Enter na klávesnici počítača. Po tomto potvrdení program naviedol obsluhu k ďalšiemu bodu.

- Export nameraných dát
Po premeraní posledného bodu, bol uskutočnený export nameraných dát vo forme protokolu vo formáte .xlsx a .pdf.
- Opätovné spustenie meracieho programu
Celý proces merania sa zopakoval od bodu „Spustenie meracieho programu“ opätovným stlačením tlačidla: Spustiť.

Pre väčšiu prehľadnosť sú jednotlivé kroky merania zobrazené v schéme na obrázku 22.



Obr. 22 Schematické zobrazenie jednotlivých krokov merania

7.2.3 Analýza výsledkov merania (osi X a Y)

Z predchádzajúceho textu vyplýva, že hlavným výstupom pri hodnotení vhodnosti bola tabuľka s výsledkami obsiahnutá vo vytvorenom vyhodnocovacom protokole (viď obrázok 23) a predovšetkým hodnoty rozlíšenia %RE, ukazovateľa vhodnosti a minimálnej tolerancie.

Rozlíšenie	RE	0,0001	mm
Tolerancia	TOL	0,0200	mm
Rozšírená neistota kalibrácie, $k_{CAL}=2$	U _{cal}	0,0024	mm
Stredná kvadratická odchýlka opakovateľnosti (Pure Error Mean Square) MSPE	MS _{EVR}	0,00000063	mm ²
Stredná kvadratická odchýlka linearity (Lack of Fit Mean Square) MSLF	MS _{LIN}	0,00000179	mm ²

Zložky neistoty (uncertainty components)			
rozlíšenie (Resolution)	u _{RE}	0,00002887	mm
neistota kalibrácie (Calibration uncertainty)	u _{cal} (k=2)	0,0012	mm
opakovateľnosť (Repeatability on reference standard)	u _{evr}	0,0008	mm
neistota linearity (Uncertainty from linearity)	u _{LIN}	0,0013	mm
kombinovaná neistota meracieho systému (Measurement system)	u _{MS}	0,0020	mm

tolerancia T (Tolerance)	TOL	0,0200	mm
rozlíšenie (Resolution)	%RE	0,5000	%
kombinovaná neistota meracieho systému (Combined standard uncertainty of MS)	u _{MS}	0,0020	mm
rozšírená neistota meracieho systému (Expanded measurement uncertainty of MS)	U _{MS} (k=2)	0,0039	mm
medzná hodnota ukazovateľa vhodnosti	Q _{MS-max}	15,00	%
ukazovateľ vhodnosti	Q _{MS}	39,33	%
minimálna tolerancia	TQ _{LMN-UMS}	0,052434	mm

Obr. 23 Tabuľka výsledkov z vyhodnocovacieho protokolu

Vyhodnotené protokoly pre merania vo všetkých stanovených polohách skleneného pravítka na pracovnom stole meracieho stroja sú súčasťou príloh tejto diplomovej práce, ako príloha č. 2.

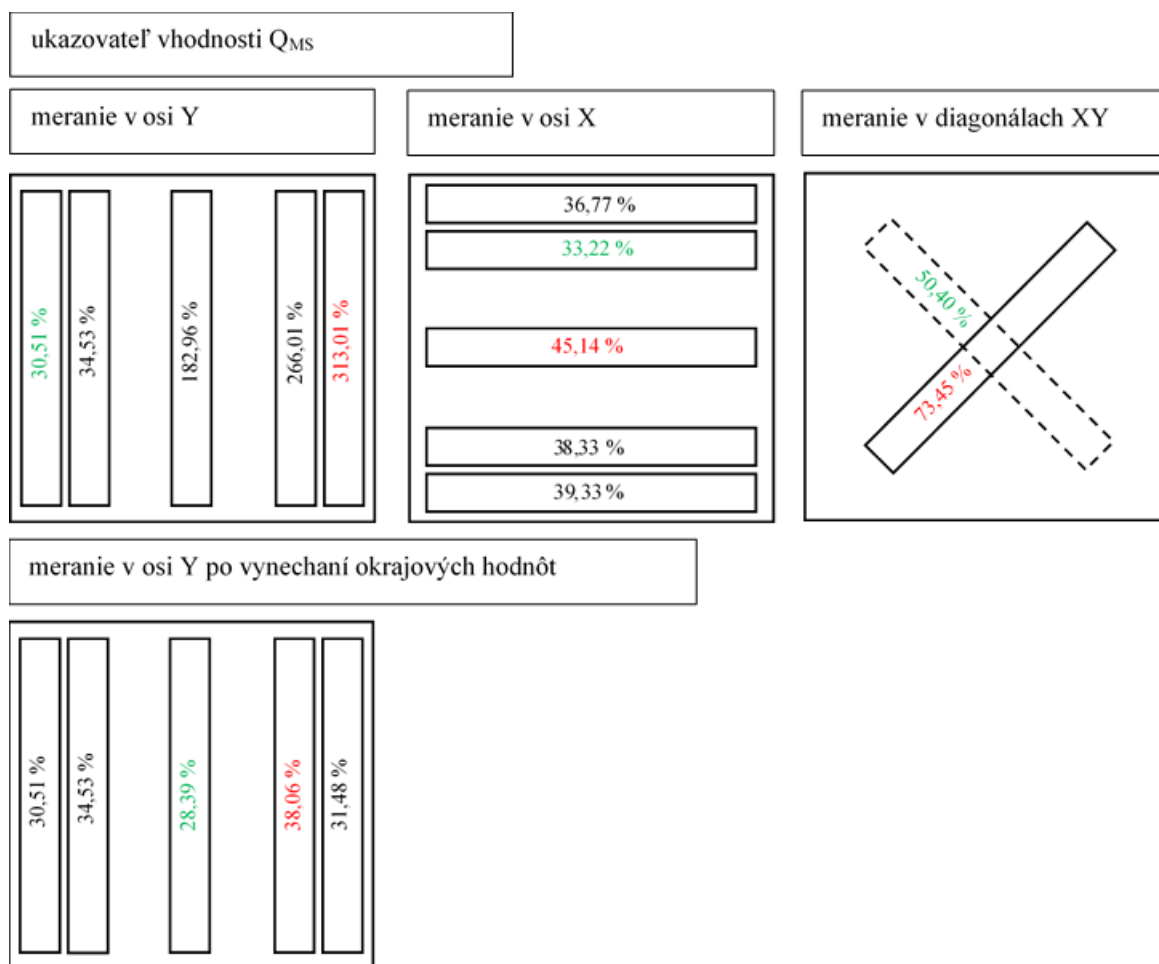
Rozlíšenie meracieho stroja predstavovala najmenšia zobrazovaná hodnota kroku, a síce RE = 0,0001 mm. Stanovená tolerancia pre meranie bola TOL = 0,02 mm. Z týchto hodnôt sa určila hodnota rozlíšenia %RE a porovnala s medznou hodnotou 5%. Vzhľadom k tomu, že hodnota %RE vyšla pre všetky merania 0,5% bolo možné o rozlíšení meracieho systému prehlásiť, že pre dané meracie úlohy v rozsahu osí X a Y je vhodné.

V prípade vyhodnocovania ukazovateľa vhodnosti meracieho systému Q_{MS}, boli vypočítané hodnoty porovnávané so stanovenou medznou hodnotou, ktorá bola stanovená na hodnotu Q_{MSmax} = 15%. Tento údaj vychádza z metódy hodnotenia vhodnosti VDA 5, podľa ktorej bol merací systém v tejto diplomovej práci posudzovaný.

Výsledky v jednotlivých polohách sú názorne zobrazené na obrázku 24. V ose Y, kde prebehli prvé merania sa hodnoty ukazovateľa vhodnosti pohybovali od 30,51% na ľavej strane pracovného stola meracieho stroja až po 313,01% na jeho pravej strane. Vzhľadom k týmto výsledkom, ktoré poukazovali na to, že merací stroj je za daných podmienok a pre danú meraciu úlohu nevhodný, bolo uskutočnené druhé vyhodnotenie, kde sa v prípadoch najhorších výsledkov (Q_{MS} od 182,96% do 313,01%) z hodnotenia vynechal posledný meraný krok

v každej z týchto meraných polôh pravítka. Po úprave výpočtu došlo k výraznému zlepšeniu výsledkov, pričom Q_{MS} sa následne pohybovala v rozmedzí od 28,39% do 38,06%, ako je názorne znázornené na obrázku 28. Týmto bolo odhalené, že v pravom hornom rohu meracieho stroja dochádza k najhorším výsledkom. Pri následnom meraní v osi X bol tento poznatok aplikovaný tak, že pravítko nebolo položené do tejto krajnej polohy, ale o 20 mm posunuté smerom nadol (t.j. 280 mm od spodného okraju stolu meracieho stroja). Toto opatrenie malo za následok dosiahnutie lepších výsledkov, napriek tomu bol aj v smere osi X merací systém vyhodnotený, ako nevhodný pre danú meraciu úlohu za stanovených podmienok. Hodnoty ukazovateľa vhodnosti Q_{MS} sa pohybovali v rozsahu od 33,22% do 45,14%, pričom najhoršia hodnota vyšla uprostred stolu meracieho stroja.

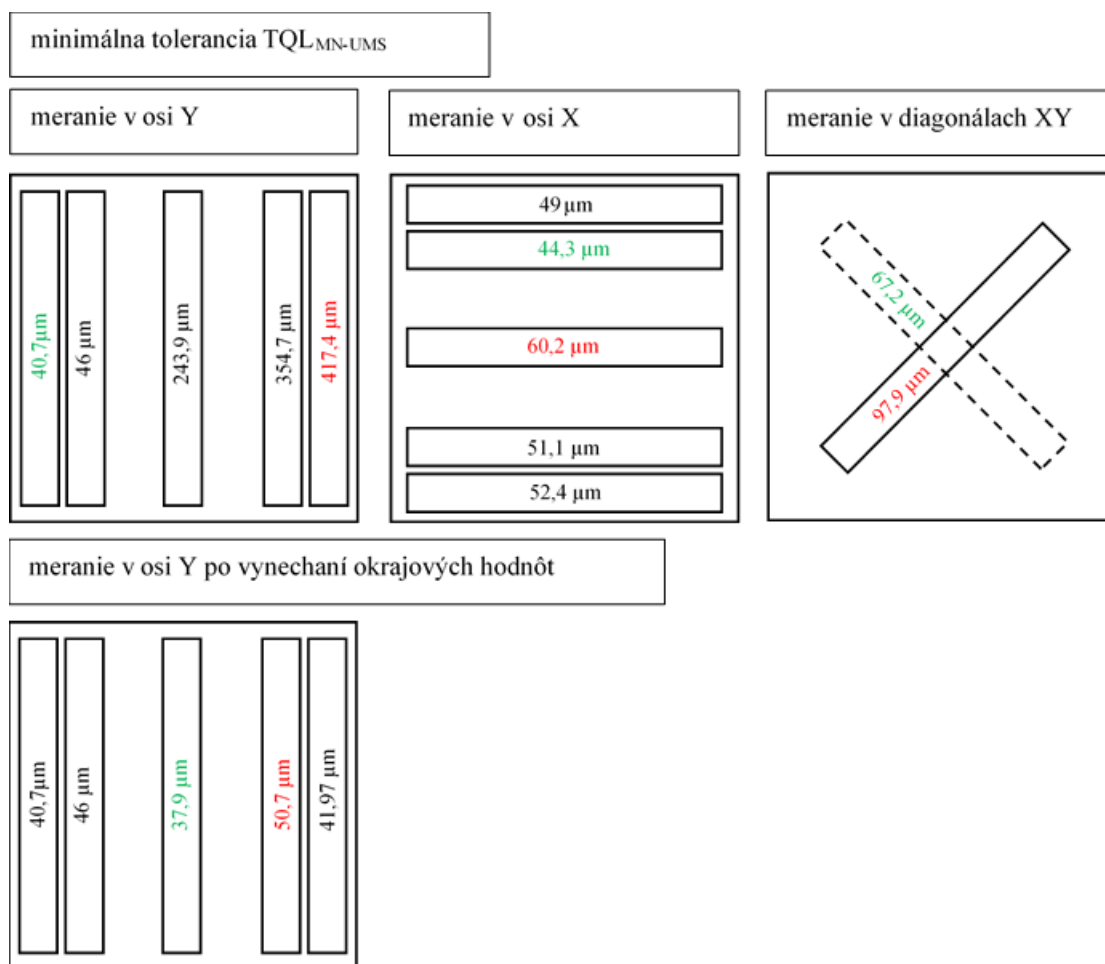
Pre overenie správnosti posúdenia, že najhoršie výsledky sú dosahované v pravom hornom rohu stola boli uskutočnené merania po diagonálach v smeroch z ľavého dolného rohu k pravému hornému a potom z ľavého horného rohu smerom k pravému dolnému. Výsledky dokázali, že v prvom prípade, kde pravítko bolo merané v odhadovanej oblasti s najhoršími výsledkami, skutočne bol výsledok horší ($Q_{MS} = 73,45\%$), oproti druhému meranému smeru, kedy pravítko v danou oblasťou neprechádzalo ($Q_{MS} = 50,40\%$).



Obr. 24 Hodnoty ukazovateľa vhodnosti Q_{MS} v meraných polohách pre $TOL = 0,020$ mm

S využitím stanovenej medznej hodnoty ukazovateľa vhodnosti, boli výpočtom určené hodnoty minimálnej tolerancie, pri ktorej by bol merací systém, v jednotlivých polohách použitého pravítka na pracovnom stole meracieho stroja, vyhodnotený ako vhodný. V prípade

zahrnutia všetkých meracích krokov, sa hodnoty $TQ_{LMN-UMS}$ pohybovali v rozmedzí od 40,7 μm do 417,4 μm . Po následnom nezahrnutí posledných krokov v polohách pravítka od stredu stola k jeho pravému okraju boli vypočítané hodnoty v rozmedzí od 37,9 μm do 50,7 μm . V prípade meraní v smere osi X boli vypočítané hodnoty $TQ_{LMN-UMS}$ v rozsahu od 44,3 μm po 60,2 μm a pri meraní po diagonálach v prvom smere 97,9 μm a druhom 67,2 μm , ako je aj zobrazené na obrázku 25.



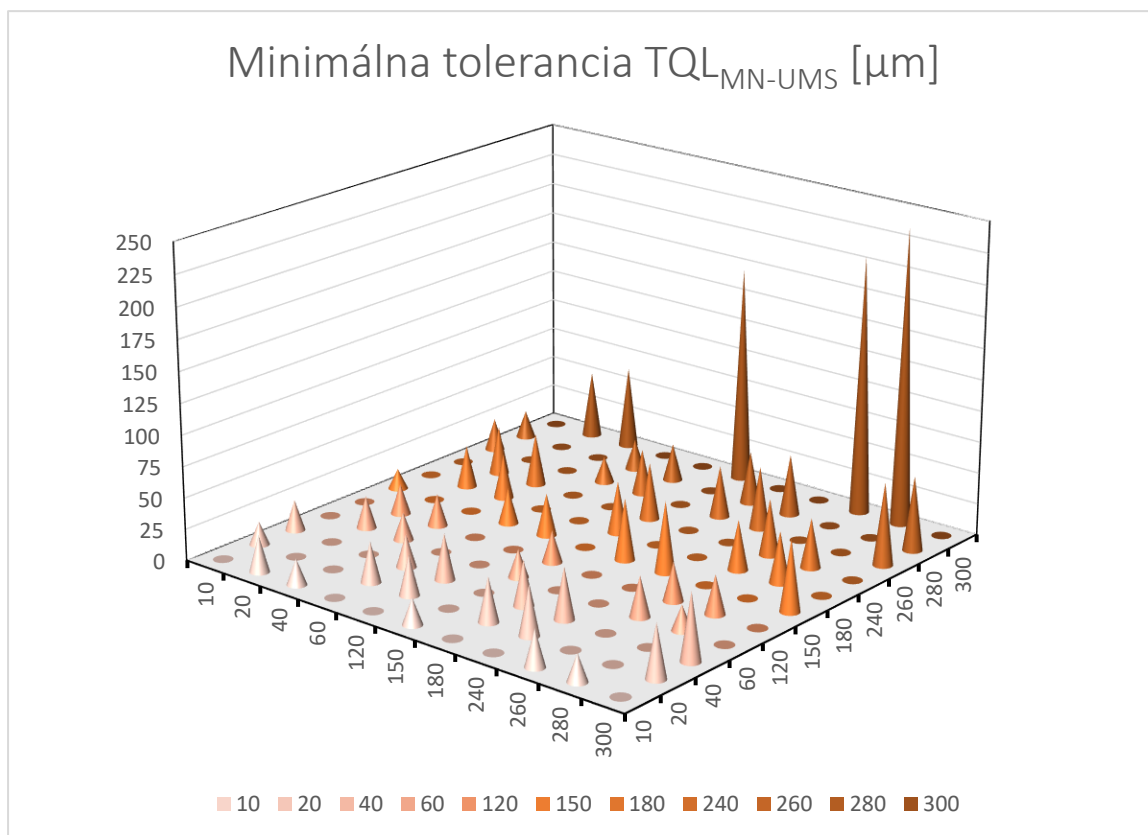
Obr. 25 Hodnoty minimálnej tolerancie $TQ_{LMN-UMS}$ v meraných polohách pravítka

Pre lepšiu prehľad o tom, v ktorých miestach pracovného stola meracieho stroja dochádzalo k najväčším chybám merania bol použitý výpočtový model pre vyhodnotenie merania po jednotlivých bodoch v rozsahu merania. Výsledky z vyhodnotenia týmto modelom sú uvedené v prílohe číslo 3, tejto práce.

Z výsledkov tohto výpočtového modelu bola zostavená tabuľka 7 a graf rozloženia minimálnych tolerancií, zobrazený na obrázku 26. Rovnako by mohla byť zostavená tabuľka a graf rozloženia v jednotlivých bodoch na pracovnej ploche stroja aj z hodnôt ukazovateľa vhodnosti Q_{MS} , ale po prekonzultovaní s vedúcim diplomovej práce bolo vďaka lepšej názornosti zvolené zobrazenie minimálnych tolerancií $TQ_{LMN-UMS}$.

Rovnako ako v prípade hodnotenia vhodnosti výpočtovým modelom na celom rozsahu merania, bolo dokázané, že k najhorším výsledkom merania dochádzalo v pravom hornom rohu pracovného stola meracieho stroja. K výrazne horším výsledkom v porovnaní s ostatnými, dochádzalo aj v najkrajnejšej polohe v pravej časti stola. Celkovo bolo možné prehlásiť, že

v rozmedzí súradníc osí X a Y 150 – 300 mm dochádzalo k postupnému zhoršovaniu výsledkov, až k tým najhorším v už spomínanom pravom hornom rohu stola (súradniciach X = 280 mm a Y = 300 mm).



Obr. 26 Rozloženie minimálnych tolerancií v [μm]

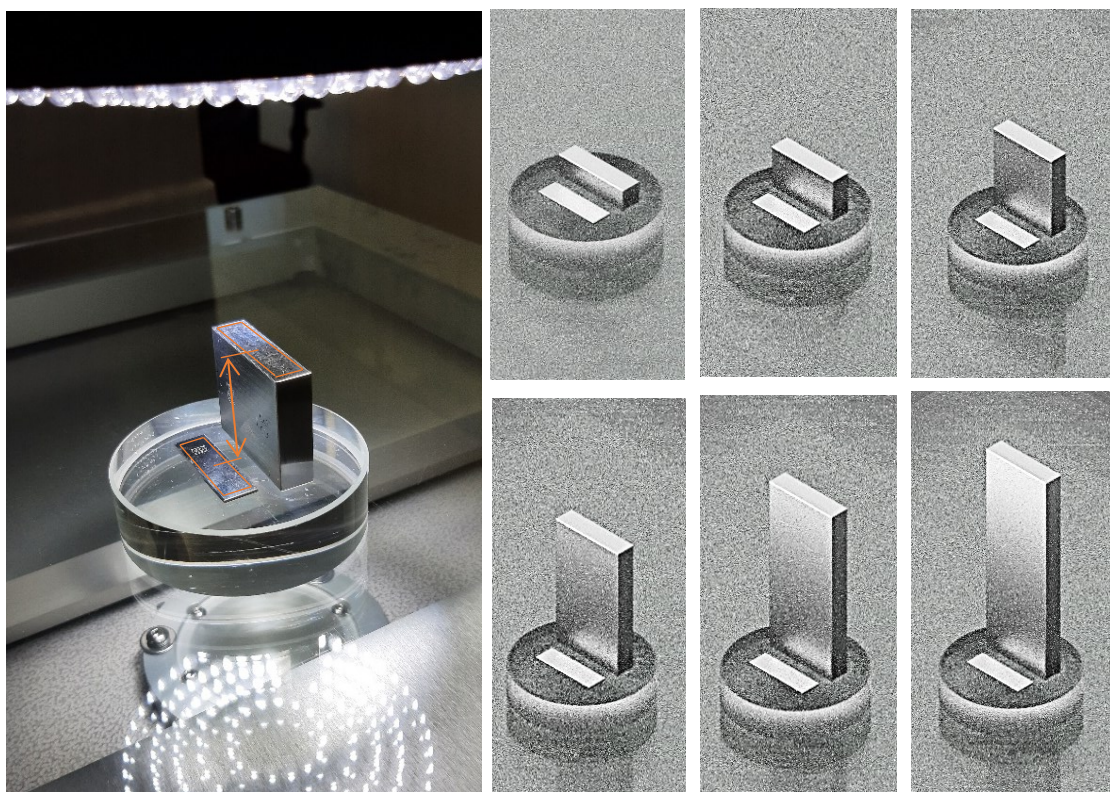
Tab. 7 vypočítané hodnoty $TQ_{L_{MN-UMS}}$ pri hodnotení po jednotlivých bodoch

		Y										
		10	20	40	60	120	150	180	240	260	280	300
X	10		18,68	24,49			16,26			25,79	21,81	
	20	29,52			26,13	24,6		33,57	38,56			53,17
	40	20,77			22,54	25,77		35,99	41,91			65,79
	60		32,81	26,45			28,89			21,3	24,75	
	120		32,26	37,09			33,87			36,1	29,98	
	150	21,46			22,72	25,72		41,85	45,59			173,86
	180		35,94	36,66			49,23			41,35	41,78	
	240		40,1	41,45			57,05			50,01	48,71	
	260	29,69			32,65	30,89		40,08	45,2			208
	280	22,05			20,43	31,34		41,14	39,48			238,49
	300		43,11	53,81			57,18			66,13	59,77	

7.3 Postup merania s využitím koncových mierok

Pre účely posúdenia vhodnosti meracieho stroja v rozsahu zvislej osi Z bol navrhnutý nasledujúci prístup. Na pracovnú dosku stroja bola uprostred umiestnená pomocná sklenená doštička. Na túto pomocnú doštičku sa nasunutím umiestnila, ako základ pre všetky merania, koncová mierka s výškou 1 mm. Vedľa tejto koncovej mierky sa postupne nasunutím umiestňovali koncové mierky podľa stanovených výšok. Jednalo sa o mierky s výškou 10 mm, 20 mm, 40 mm, 60 mm, 80 mm a 100 mm, čo bolo zároveň najvyššia mierka v použitej sade koncových mierok. Uloženie jednotlivých mierok na pomocnej sklenenej doštičke je zobrazené v nákresoch v pravej časti obrázku 27. Jednotlivé výšky mierok boli zvolené tak, aby bola pokrytá čo najväčšia časť výrobcom deklarovaného rozsahu. Meranie prebehlo zameraním meraných bodov najskôr na koncovej mierke 1 mm a následne zameraním bodov na povrchu druhej mierky, ako zobrazuje pravá časť obrázku 27. Meraná hodnota tak predstavovala vzájomnú vzdialenosť horných povrchov oboch koncových mierok. Pri jednotlivých výškach mierok pozdĺž osi Z sa uskutočnilo celkovo 10 opakovaných meraní.

Vzhľadom k tomu, že optický systém je pri meraní vždy potrebné priblížiť do relatívne malej vzdialenosti od meraného povrchu, muselo meranie s použitím mierok výšok od 60 mm prebehnúť s vložením druhej koncovej mierky až po zameraní bodov na prvej mierke (s výškou 1 mm).



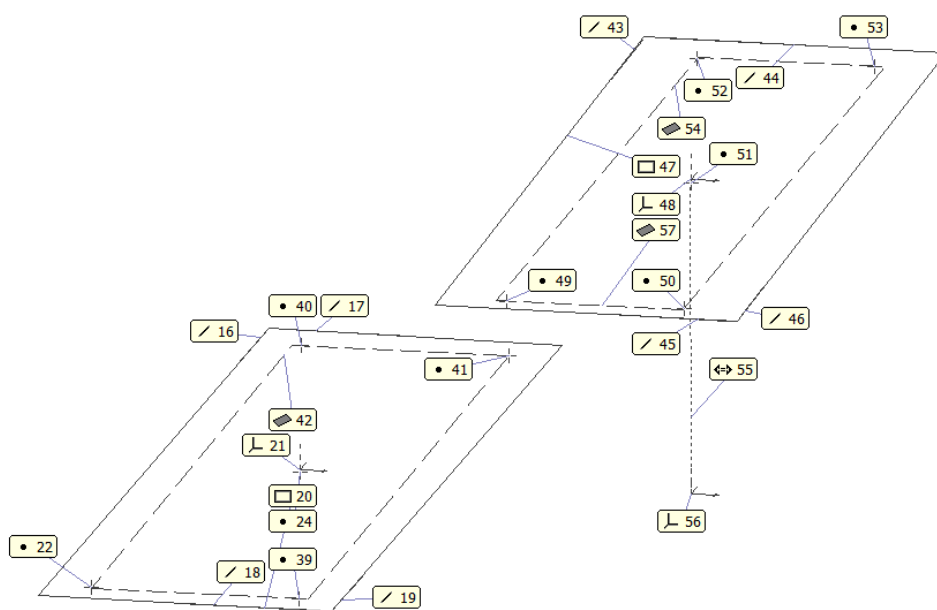
Obr. 27 Uloženie koncových mierok na pomocnej sklenenej doštičke

7.3.1 Merací program

Rovnako ako v prípade meraní vo vodorovných osiach X a Y, aj v prípade merania vo zvislej osi Z, bol merací program vytvorený modifikáciou pôvodného programu, zostaveného na Ústave výrobných strojů, systémů a robotiky FSI VUT v Brně, za účelom prvotných meraní na tomto meracom stroji. Tento program (mierky_3) tvorí prílohu č. 7 tejto práce.

Záznam jednotlivých charakteristik v meracom programe z programového rozhrania softvéru InSpec a vyznačenie týchto charakteristík v grafickom zobrazení v softvéri, sú zobrazené na obrázku 28.

Charakteristiky		
✓ Přímka	16	manuálně (obsluhou) zadání přímek v rohoch spodnej koncovej mierky
✓ Přímka	17	
✓ Přímka	18	
✓ Přímka	19	
□ Obdélník	20	jednotlivé merané body na spodnej mierke
└ Souřadný systém	21	
• Bod	22	
• Bod	39	
• Bod	24	
• Bod	40	manuálně (obsluhou) zadání přímek v rohoch hornej koncovej mierky
• Bod	41	
▧ Rovina	42	
✓ Přímka	43	
✓ Přímka	44	jednotlivé merané body na hornej mierke
✓ Přímka	45	
✓ Přímka	46	
□ Obdélník	47	
└ Souřadný systém	48	
• Bod	49	vyhodnocovaná vzdálenost' mezi mírkami
• Bod	50	
• Bod	51	
• Bod	52	
▧ Rovina	54	
↔ Vzdálenost	55	
└ Souřadný systém	56	
▧ Rovina	57	



Obr. 28 Charakteristiky meracieho programu[52]

7.3.2 Postup merania v jednotlivých krokoch

Technické uskutočnenie jednotlivých meraní pozostávalo z viacerých krokov. Prvé meranie sa, oproti ďalším opakovaným, líšilo v prvých piatich krokoch, ktoré bolo potrebné uskutočniť len na začiatku a pri ďalších meraniach už neopakovať, z dôvodu zachovania rovnakých podmienok pri všetkých opakovaných meraniach. Avšak z dôvodu technických možností meracieho stroja Micro-Vu Sol 311, museli byť vyššie mierky (nad 60 mm), nasúvané až v priebehu merania, po zameraní spodnej mierky.

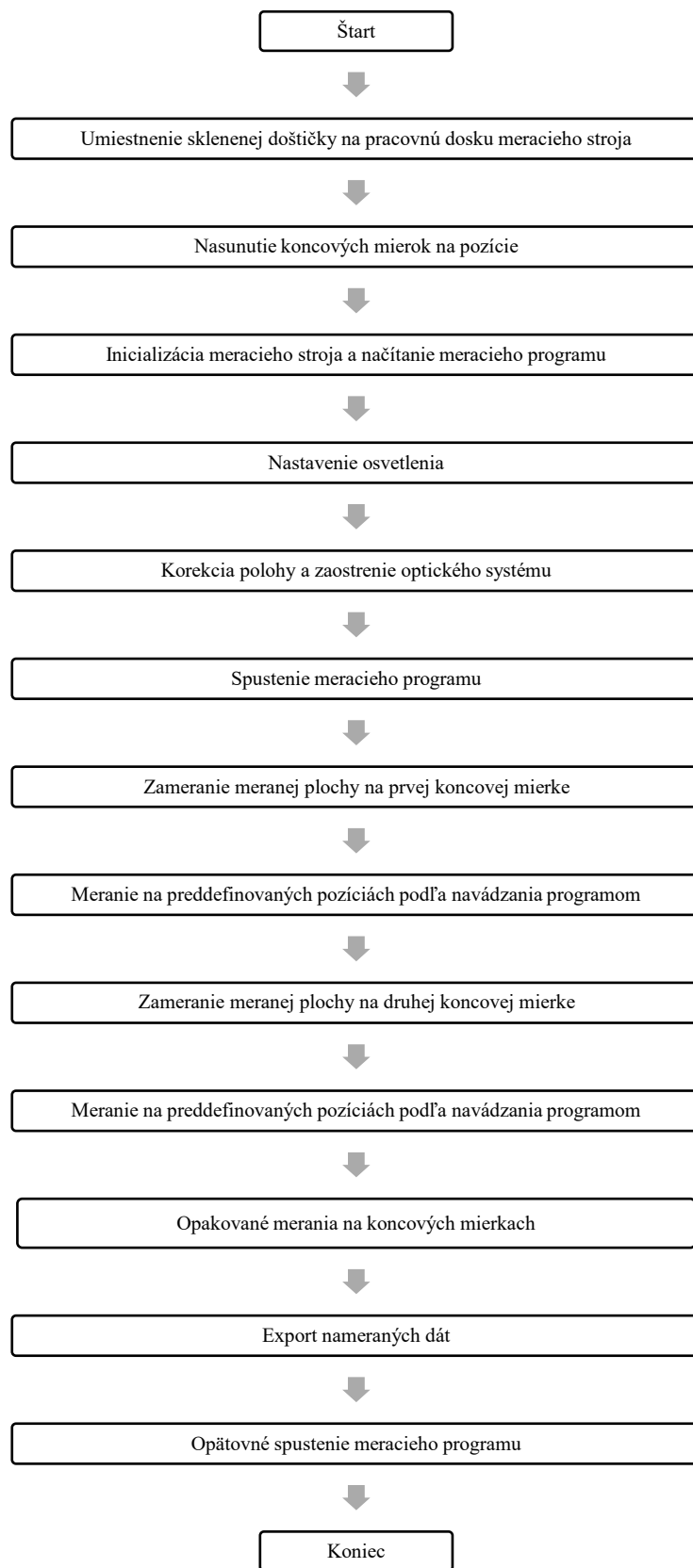
Samotné kroky boli nasledujúce:

- Umiestnenie sklenenej doštičky na pracovnú dosku meracieho stroja
Pomocná sklenená doštička sa pred umiestnením na pracovnú dosku očistila, rovnako aj samotná pracovná doska a následne bola doštička umiestnená do stredu pracovnej dosky stola
- Nasunutie koncových mierok na pozície
Koncové mierky sa očistili a následne nasunutím umiestnili na pozície na pomocnej sklenenej doštičke. V prípade meraní s koncovými mierkami vyššími ako 60 mm, bola nasunutá len prvá koncová mierka (1 mm) a druhá sa nasunula až po zameraní bodov na prvej mierke.
- Inicializácia meracieho stroja a načítanie meracieho programu
V tomto kroku sa spustí merací stroj a softvér InSpec. Program obsluhu vyzve k inicializácii meracieho stroja, ktorá prebieha manuálnym posuvom v smere všetkých osí stroja pomocou manuálnych klúč, prechodom cez referenčné značky.
Po tomto úkone dôjde ku kalibrácii rozsahu stroja a dokončeniu jeho prípravy pred meraním.
- Nastavenie osvetlenia
Nastavenie osvetlenia bolo možné v meracom programe preddefinovať. V prípade, že preddefinované nebolo, bolo potrebné manuálne nastavenie druhu a intenzity osvetlenia, ktoré sa pri meraní použilo. V takom prípade bolo nutné nastavovať druh i intenzitu osvetlenia v každej meranej pozícii.
- Korekcia polohy a zaostrenie optického systému
Pomocou manuálnych posuvov bola zameraná oblasť, v ktorej sa nachádzala prvá meraná pozícia a pomocou posuvu v smere osi Z bolo uskutočnené zaostrenie optického systému na prvú rysku pravítka.
- Spustenie meracieho programu
Merací program bol spustený pomocou tlačidla: Spustit.
- Zameranie meranej plochy na prvej koncovej mierke
Podľa navádzania programom bolo uskutočnené zameranie polohy rohov na prvej (spodnej) koncovej mierke, manuálnym vyznačením priamky v meracom programe.
- Meranie na preddefinovaných pozíciách podľa navádzania programom
Po zameraní rohov koncovej mierky, merací stroj identifikoval pozíciu koncovej mierky, zväčšil zaostrenie na plochu mierky a začal navádzať pomocou

orientačnej šípky obsluhu k ďalším meraným bodom. Po presunutí do meranej pozície bolo potrebné znovu zaostriť optický systém (pohybom kľuky v smere osi Z) a meranie v danom mieste potvrdiť buď nášľapným tlačidlom, prípadne klávesou Enter na klávesnici počítača. Po tomto potvrdení program naviedol obsluhu k ďalšiemu bodu. Po zosnímaní všetkých bodov na mierke, program oddialil snímáciu hlavu a čakal na presun obsluhou k druhej koncovej mierke.

- Zameranie meranej plochy na druhej koncovej mierke
Po presune optického systému a preostrení, bolo podľa navádzania programom, uskutočnené zameranie polohy rohov na druhej (hornej) koncovej mierke, manuálnym vyznačením priamky v meracom programe.
- Meranie na preddefinovaných pozíciách podľa navádzania programom
Po zameraní rohov koncovej mierky, merací stroj identifikoval pozíciu koncovej mierky, zväčšil zaostrenie na plochu mierky a začal navádzať pomocou orientačnej šípky obsluhu k ďalším meraným bodom. Po presunutí do meranej pozície bolo potrebné znovu zaostriť optický systém (pohybom kľuky v smere osi Z) a meranie v danom mieste potvrdiť buď nášľapným tlačidlom, prípadne klávesou Enter na klávesnici počítača. Po tomto potvrdení program naviedol obsluhu k ďalšiemu bodu až kým neboli zosnímané všetky preddefinované body na mierke.
- Export nameraných dát
Po premeraní posledného bodu, bol uskutočnený export nameraných dát vo forme protokolu vo formáte .xlsx a .pdf.
- Opätovné spustenie meracieho programu
Celý proces merania sa zopakoval od bodu „Spustenie meracieho programu“ opätovným stlačením tlačidla: Spustiť.

Pre väčšiu prehľadnosť sú jednotlivé kroky merania zobrazené v schéme na obrázku 29.



Obr. 29 Schematické zobrazenie jednotlivých krokov merania

7.3.3 Analýza výsledkov merania (osa Z)

Rovnako ako v prípade hodnotenia v smeroch osí X a Y, predstavovala i pri meraní v smere osi Z, rozlíšenie meracieho stroja, najmenšia zobrazovaná hodnota kroku, a síce $RE = 0,0001$ mm. Stanovená tolerancia pre meranie bola $TOL = 0,02$ mm. Z týchto hodnôt sa určila hodnota rozlíšenia $\%RE$ a porovnala s medznou hodnotou 5%. Vzhľadom k tomu, že hodnota $\%RE$ vyšla pre všetky merania 0,5% bolo možné o rozlíšení meracieho systému prehlásiť, že pre dané meracie úlohy v rozsahu osi Z je vhodné.

V prípade hodnotenia podľa hodnoty ukazovateľa vhodnosti Q_{MS} vyšlo, že pri zadanej tolerancii $TOL = 0,02$ mm nie je merací systém pre danú úlohu vhodný ($Q_{MS} = 155,69\%$). Aby bol v takomto prípade merací systém vhodný, musela by byť minimálna tolerancia TOL_{MN-UMS} väčšia ako $207,6$ μm . Takáto hodnota minimálnej tolerancie bola však neprípustná.

Pre lepšiu prehľad o tom, v ktorých meraných výškach koncových mierok, dochádzalo k najväčším chybám merania bol použitý výpočtový model pre vyhodnotenie merania po jednotlivých bodoch (výškach mierok) v rozsahu meracieho stroja. Výpočtom pomocou tohto modelu bolo dokázané, že ukazovateľ vhodnosti sa od najnižších k najvyšším koncovým mierkam pohybuje v rozsahu 18,17% až 144,97%. Minimálna tolerancia, pri ktorej by bol, za stanovených podmienok, merací systém vhodný pre danú úlohu, by musela byť väčšia ako $24,22 - 193,29$ μm . Výrazné zhoršenie v týchto hodnotách nastalo pri použití koncovej mierky rozmeru 60 mm a ďalších nasledovných vyšších. Z toho bolo odhadnuté, že ku zhoršeniu výsledkov dochádza pri vkladaní druhej koncovej mierky až v priebehu merania. Toto bolo podmienené obmedzenými možnosťami zaostrovanie meracím strojom, ktorý pre zaostrenie povrchu dolnej koncovej mierky potreboval približnú vzdialenosť maximálne 50 mm od jej povrchu.

Tento odhad zhoršujúceho vplyvu na výsledky merania bol potvrdený uskutočnením opätovného posúdenia vhodnosti výpočtom pôvodným výpočtovým modelom, avšak už len pre merania, kedy obe merané koncové mierky boli na pomocnú sklenenú doštičku nasunuté pred začiatkom meraní. Merací systém bol pre danú meraciu úlohu síce opäť vyhodnotený ako nevhodný (ukazovateľ vhodnosti Q_{MS} bol 18,05%), ale minimálna tolerancia pri ktorej by bol merací systém vhodný, sa znížila už len na hodnotu $24,1$ μm .

Celkovo z posúdenia vhodnosti meracieho stroja pri meraní v smere osi Z, bolo možné konštatovať, že zvolený merací postup, kedy sa meraná vzdialenosť vo zvislom smere určuje ako rozdiel medzi vzdialenosťami plôch hornej a dolnej koncovej mierky, je vhodný len pre vyhodnocovanie v hodnotách meranej vzdialenosti do približne 50 mm. Pre overenie vhodnosti meracieho stroja na meranie väčších vzdialeností pozdĺž osi Z, by bolo potrebné vytvoriť iný postup merania.

7.4 Odporúčania pre ďalší rozvoj riešenej problematiky

Na základe získaných poznatkov z uskutočnených meraní v rámci posudzovania vhodnosti optického CMM, boli stanovené nasledovné odporúčania.

Hlavným odporúčením je pred uskutočnením budúcich meraní, objednať servis stroja, servisným partnerom a požiadať o zopakovanie kalibrácie celého stroja a uloženie hodnôt do korekčnej mapy.

Korekčná mapa by mala byť zostavená ideálne servisným technikom, ale v prípade potreby by ju bolo možné vytvoriť s využitím súboru nameraných dát, ktorý bol získaný v priebehu vypracovávaní tejto diplomovej práce. Pomocou získanej korekčnej mapy by sa následne mohla uskutočniť vlastná kalibrácia meracieho stroja. Tento postup odporúčam len v prípade, ak by sa predĺžila doba, kým bude môcť prísť servisný partner uskutočniť kalibráciu meracieho stroja.

Čo sa týka budúcich meraní, v prípade, že bude opäť posudzovaná vhodnosť meracieho systému s využitím metódy hodnotenia VDA 5, odporúčam používať vyhodnocovací protokol, ktorý je jedným z výstupov tejto práce. Použitie tohto protokolu umožní rýchle a prehľadné zhodnotenie, či je za daných podmienok merací systém pre konkrétnu meráciu úlohu vhodný.

Z pohľadu technického uskutočňovania meraní, odporúčam pre budúce merania zabezpečiť ustálené normálne meracie podmienky, predovšetkým zamedziť vplyvom zvýšených teplôt, ale zároveň aj kolísaniu teploty v priebehu meraní.

Okrem toho odporúčam zmenšiť hodnotu kroku merania z uskutočňovaných 60 mm na 10 mm, aby bol merací rozsah stroja v jednotlivých smeroch analyzovaný podrobnejšie. Zároveň odporúčam merať v oboch smeroch jednotlivých ručných pohybov stola. Týmto postupom bude dôkladnejšie preskúmané správanie sa CMM v jednotlivých častiach meracieho rozsahu.

V prípade hodnotenia vhodnosti prístroja pre meranie výškových rozmerov v smere osi Z, odporúčam uskutočniť merania nie len uprostred meracieho stola, ale aj v polohách po celej jeho ploche. Aj v tomto prípade odporúčam uskutočňovať merania od spodnej referencie k hornej referencií a následne opačne. Ako referencia môžu byť opäť použité koncové mierky, ako to bolo v prípade meraní v tejto práci, avšak odporúčam použitie novej sady koncových mierok, ktoré budú mať povrchy, čo najmenej poškodené ryhami, alebo inými defektami. Prípadne odporúčam skúsiť meranie na keramických koncových mierkach, namiesto oceľových.

Ako posledné by som odporučil vytvorenie podrobnejšieho postupu merania pre meracieho stroja Micro-Vu Sol 311, aby aj nezaškolená obsluha, bola schopná uskutočniť merania bez dopustenia sa hrubých chýb merania.

8 ZÁVER

Diplomová práca sa zaoberala posudzovaním vhodnosti konkrétneho typu optického súradnicového meracieho stroja (CMM) – Micro-Vu Sol 311, pre použitie za stanovených podmienok. Dosiahnuté výsledky sú plne využiteľné pre budúce používanie tohto stroja v metrologickom laboratóriu na pôde Fakulty strojního inženýrství v Brně.

Prvým stanoveným cieľom práce bol popis súčasného stavu súradnicových meracích strojov s bližším zameraním na bezdotykové senzorké systémy. Tento cieľ bol splnený v kapitole 4, kde boli popísané konštrukčné typy súradnicových meracích strojov, stručne bolo pojednané o dotykových a podrobnejšie o bezdotykových senzorkých systémoch týchto strojov. Následne boli porovnané dotykové a bezdotykové súradnicové meracie stroje a v závere kapitoly bol uvedený popis najčastejších zdrojov chýb merania a vplyvy na neistotu merania na CMM.

Druhým cieľom bol popis súčasného stavu hodnotenia vhodnosti CMM. Tento cieľ bol splnený v kapitolách 3.3 a 3.4. Okrem definícií charakterizujúcich vhodnosť meracích strojov, boli popísané aj 3 najznámejšie postupy hodnotenia vhodnosti (VDA 5, MSA a hodnotenie podľa normy ČSN ISO 22514-7).

Tretím cieľom bol podrobný systematický rozbor zvoleného postupu posúdenia vhodnosti CMM. Tento cieľ bol splnený v kapitole 5, kde bol všeobecne rozobraný postup stanovenia vhodnosti podľa metódy VDA 5. Ďalej bol tento cieľ naplnený v kapitole 7, kde bol podrobnejšie vysvetlený postup stanovenia ukazovateľa vhodnosti, ktorý je základným rozhodovacím údajom pre stanovenie vhodnosti meracieho stroja.

Štvrtým cieľom bol popis základných vlastností skúmaného stroja Micro-Vu Sol 311, ktorý bol splnený v kapitole 6. V tejto kapitole bolo stručne popísané výrobné portfólio spoločnosti Micro-Vu Corporation a následne boli popísané základné vlastnosti CMM Micro-Vu Sol 311. Okrem technických parametrov bol priblížený aj metrologický softvér InSpec, ktorý je dodávaný spolu s meracím strojom a slúži na ovládanie tohto stroja, ale aj ku zberu a vyhodnocovaniu nameraných dát.

Piatym cieľom bolo navrhnutie a zdôvodnenie etalónov, ktoré sa mali použiť na hodnotenie vhodnosti meracieho stroja. Tento cieľ bol splnený v kapitole 7.1, kde boli popísané vlastnosti zvolených etalónov. Pre osi X a Y bolo ako etalón zvolené kalibrované sklenené pravítko s vysokou presnosťou a pre merania v smere osi Z boli ako etalóny zvolené koncové mierky.

Šiestym cieľom bolo posúdenie vhodnosti meracieho stroja, ktorý bol splnený v kapitolách 7.2 až 7.3.3, pričom bola hodnotená vhodnosť vo všetkých troch osiach meracieho stroja. Z nameraných dát boli uskutočnené hodnotenia pre jednotlivé osi CMM. V smere osi Y boli najlepšie výsledky dosiahnuté pri uložení skleneného pravítka do polohy pozdĺž ľavej hrany skla meracieho stola (hodnota minimálnej tolerancie, pri ktorej by bol CMM pre stanovenú úlohu vhodný bol v tomto prípade $TQL_{MN-UMS} = 40,7\mu m$). V prípade hodnotenia v smere osi X bol najlepší výsledok pri hodnotení na celom rozsahu merania, v polohe 260 mm od spodnej hrany meracieho stola ($TQL_{MN-UMS} = 44,3\mu m$). V kapitole 7.2.3 je uvedená podrobná analýza meraní v rozsahu osí Y a X. Pre lepšiu názornosť a stanovenie konkrétnejších bodov s najnižšou hodnotou minimálnej tolerancie, bol vytvorený alternatívny vyhodnocovací model. Týmto modelom boli stanovované hodnoty minimálnej tolerancie vo všetkých

meraných bodoch. Vďaka tomu bolo určené miesto s najnižšou minimálnou toleranciou pre stanovené podmienky ($TQ_{LMN-UMS} = 20,77 \mu m$). Toto miesto bolo podľa očakávania v ľavom dolnom rohy stola, konkrétne v súradniciach $X = 40 \text{ mm}$ a $Y = 10 \text{ mm}$.

Pre hodnotenie v osi Z boli použité rovnaké výpočtové modely. Pri hodnotení na celom meranom rozsahu bol najlepší výsledok – najnižšia minimálna tolerancia $TQ_{LMN-UMS} = 24,1 \mu m$. Pri použití modelu hodnotenia v jednotlivých bodoch bol najlepší výsledok $TQ_{LMN-UMS} = 24,22 \mu m$.

Siedmym cieľom bolo vytvorenie protokolu v prostredí programu MS Excel slúžiaceho pre prehľadné a efektívne vyhodnotenie vhodnosti CMM z nameraných hodnôt. Tento cieľ bol splnený vytvorením funkčného a predovšetkým prehľadného vyhodnocovacieho protokolu. Popis jednotlivých častí tohto protokolu je obsiahnutý v kapitole 7.1.4. Vzorový protokol v podobe súboru .xlsx, je súčasťou príloh tejto práce a môže byť používaný pre efektívne vyhodnocovanie pri budúcich meraniach v metrologických laboratóriách na Ústave výrobných strojů, systémů a robotiky FSI VUT v Brně.

Posledným ôsmym cieľom bola formulácia zdôvodnených odporúčení pre ďalší rozvoj riešenej problematiky. Tento cieľ bol splnený zostavením odporúčaní pre budúce merania, zhrnutých v kapitole 7.4 .

9 ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV [54]

- [1] MARESCA, P., J. CAJA, V. MARTINEZ, E. GÓMEZ a C. BARAJAS. Considerations to the verification of optical measuring machines according to ISO 10360. *Procedia Manufacturing* [online]. Amsterdam: Elsevier, 2017, **2017**(13), 511-518 [cit. 2021-4-10]. ISSN 2351-9789. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.075>
- [2] MONTGOMERY, Douglas C. *Introduction to Statistical Quality Control*. Sixth Edition. New Jersey: John Wiley, 2009. ISBN 978-0-470-16992-6.ň
- [3] Kvalita, spolehlivost a bezpečnost: Detail oboru. *Fakulta strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně* [online]. Brno: FSI VUT, 2021 [cit. 2021-4-6]. Dostupné z: <https://www.fme.vutbr.cz/studenti/programy/obor/13134>
- [4] Vhodnost kontrolních procesů: Vhodnost měřicích systémů, vhodnost procesů měření a kontroly, rozšířená nejistota, posuzování shody. 2. vydání. Praha: Česká společnost pro jakost, 2011. Management jakosti v automobilovém průmyslu. ISBN 978-80-02-02307-4.
- [5] *Metrologie v kostce: Sborníky technické harmonizace* [online]. 3. dopl. vyd. Praha: Nakladatelský servis: Bořivoj Kleník, PhDr. – Q-art, 2009 [cit. 2021-4-16]. Dostupné z: https://www.unmz.cz/sborniky_th/sb2009/MvK_7_vidit_hypervazby_small.pdf
- [6] ČECH, Jaroslav, Jiří PERNIKÁŘ a Kamil PODANÝ. *Strojírenská metrologie I*. Vyd. 5., V Akademickém nakl. CERM vyd. 3. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. ISBN 978-80-214-4010-4.
- [7] *Terminologie z oblasti metrologie: Sborníky technické harmonizace* [online]. 2. vyd. Praha: Nakladatelský servis: Bořivoj Kleník, PhDr. – Q-art, 2010 [cit. 2021-4-7]. Dostupné z: https://www.unmz.cz/files/Sborn%C3%ADky%20TH/Terminologie%20v%20oblasti%20metrologie_DEF.pdf
- [8] *Pokyn pro vyjadřování nejistoty měření (GUM): Sborníky technické harmonizace* [online]. Praha: Nakladatelský servis: Bořivoj Kleník, PhDr. – Q-art, 2012 [cit. 2021-3-26]. Dostupné z: <https://www.unmz.cz/files/Sborn%C3%ADky%20TH/GUM%20-%20celek%20-DEF.pdf>
- [9] *Measurement systems analysis: Reference Manual*. 4. vyd. Michigan: AIAG, 2010. ISBN 978-1-60-534211-5.
- [10] MOTYČKA, Martin a Olga TŮMOVÁ. Metody analýzy vhodnosti měřicích systémů. *ElectroScope: online časopis pro elektrotechniku* [online]. Plzeň: Fakulta elektrotechnická – Západočeská univerzita v Plzni, 2013, **2013**(2) [cit. 2021-3-12]. ISSN 1802-4564. Dostupné z: http://147.228.94.30/images/PDF/Rocnik2013/Cislo2_2013/r7c1c7.pdf
- [11] PERNIKÁŘ, Jiří. Hodnocení způsobilosti kontrolních prostředků. *Fakulta strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně* [online]. Brno: FSI VUT, 2021 [cit. 2021-4-19]. Dostupné z: http://gps.fme.vutbr.cz/STAH_INFO/31_Pernikar_VUTBR.pdf
- [12] ŠKUTOVÁ, Lucia. *Návrh průměrného přípravku pro kontrolu rámu rypadla na CMM*. Praha, 2020. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie. Vedoucí práce Petr Mikeš.

- [13] FLACK, David, James CLAVERLEY a Richard LEACH. Coordinate Metrology. LEACH, Richard. *Fundamental Principles of Engineering Nanometrology*. 2. vyd. Amsterdam: Elsevier, 2014, s. 295-325. ISBN 978-1-4557-7753-2. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/B978-1-4557-7753-2.00009-8>
- [14] CHRISTOPH, Ralf a Hans Joachim NEUMANN. *Multisensor Coordinate Metrology: Dimensional Measurement Using Optics, Probes, and X-ray Tomography*. Munich: Verlag moderne Industrie, 2016. ISBN 978-3-86236-099-4.
- [15] GAO, Wei, ed. *Metrology*. Singapore: Springer Nature, 2019, 629 s. ISBN 978-981-10-4937-8. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1007/978-981-10-4938-5>
- [16] ČEPOVÁ, Lenka a Lenka PETŘKOVSKÁ. *Legislativa ve strojírenské metrologii a přesné měření 3D ploch: studijní opora* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011 [cit. 2021-3-13]. ISBN 978-80-248-2514-4. Dostupné z: http://projekty.fs.vsb.cz/019/dokumenty/METROLOGIE_FINAL.pdf
- [17] ČSN EN ISO 10360-1. Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Přejímací a periodické zkoušky souřadnicových měřicích strojů (CMM) - Část 1: Slovník. Praha: Český normalizační institut, 2001, 44 s. Třídící znak 25 2011.
- [18] DRBÚL, Mário, Michal ŠAJGALÍK, Ján ŠEMCER, Tatiana CZÁNOVÁ, Lenka PETŘKOVSKÁ a Lenka ČEPOVÁ. *Strojárska metrológia a kvalita povrchov vytvorených technológiami obrábania* [online]. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, 2014, 115 s. [cit. 2021-5-2]. ISBN 978-80-89276-45-5. Dostupné z: <http://projekty.fs.vsb.cz/064/docs/metrologie.pdf>
- [19] Deciding Between a Non-Contact Metrology Platform and a Traditional CMM. *DWFritz Automation* [online]. Wilsonville: DWFritz Automation, 2019 [cit. 2021-5-6]. Dostupné z: <https://www.dwfriz.com/2019/06/30/deciding-between-a-non-contact-metrology-platform-and-a-traditional-cmm/>
- [20] Contact vs. Noncontact Measurement for Computer-Aided Inspection. *Quality Magazine* [online]. Troy: BNP Media, 2013 [cit. 2021-4-4]. Dostupné z: <https://www.qualitymag.com/articles/91150-contact-vs-noncontact-measurement-for-computer-aided-inspection>
- [21] NÁVRAT, Jakub. *Porovnání měřicích metod pro kontrolu kvality dílů*. Ostrava, 2019. Diplomová práce. Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie. Vedoucí práce Robert Čep.
- [22] Q-DAS® GmbH: Leitfaden zum "Fähigkeitsnachweis von Messsystemen". Birkenau: Q-DAS, 2002.
- [23] Přehled projektů OP VVV na VUT v Brně. *Vysoké učení technické v Brně* [online]. Brno: FSI VUT, 2021 [cit. 2021-4-17]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/vav/projekty-sf/op-vvv>
- [24] Seznam norem ČSN. *Technor: Ing. Jiří Řezníček* [online]. Hradec Králové: TECHNOR print, c2005–2018 [cit. 2021-2-15]. Dostupné z: <http://www.technicke-normy-csn.cz/technicke-normy/>
- [25] DOUGHTY, Evan. Understanding and Complying with Metrology Requirements. *ASQ: Excellence Through Quality* [online]. Milwaukee: American Society for Quality, c2021 [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: <https://asq.org/asd/2016/03/understanding-and-complying-with-metrology-requirements.pdf>

- [26] ANSI/NCSL Z540.1 Certification Definition. *Thomas: For Industry* [online]. New York: Thomas Publishing Company, c2021 [cit. 2021-5-2]. Dostupné z: https://certifications.thomasnet.com/certifications/glossary/quality-certifications/ansi_ncsl/ansi_ncsl-z540-1/
- [27] JCGM 200:2012: International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM). *Bureau International des Poids et Mesures* [online]. Saint-Cloud: BIPM, 2012 [cit. 2021-3-25]. Dostupné z: https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_200_2012.pdf
- [28] ČSN ISO 22514-7. *Statistické metody v managementu procesu – Způsobilost a výkonnost – Část 7: Způsobilost procesů měření*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014, 48 s. Třídící znak 010277.
- [29] RABINOVICH, Semyon G. *Evaluating Measurement Accuracy: A Practical Approach*. Second Edition. New York: Springer-Verlag, 2013. ISBN 978-1-4614-6716-8.
- [30] ČSN EN ISO 14253-2. Geometrické specifikace produktu (GPS) - Kontrola obrobků a měřicího vybavení měřením – Část 2: Návod pro odhad nejistoty měření v GPS, při kalibraci měřicího vybavení a při ověřování výrobku. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012, 68 s. Třídící znak 014100.
- [31] CHRISTOPH, Ralf a Hans Joachim NEUMANN. Multisenzorová souřadnicová měřicí technika: Dimenzionální měření optikou, dotykovým senzorem a počítačovou tomografií. Uherský Brod: PRIMA BILAVČÍK, 2015. ISBN 978-3-86236-050-5.
- [32] *Směrnice evropského parlamentu a rady 2004/22/ES: Sborníky technické harmonizace* [online]. Praha: Nakladatelský servis: Bořivoj Kleník, PhDr. – Q-art, 2007 [cit. 2021-4-3]. Dostupné z: https://www.unmz.cz/sborniky_th/sb2007/smernice_2004_22_ES.pdf
- [33] MOOR, Pamela Murray. *Modeling Coordinate Measuring Machine Scanning Operations*. Knoxville, 2007. Dostupné také z: https://trace.tennessee.edu/utk_graddiss/408/. Disertační práce. The University of Tennessee. Vedoucí práce William R. Hamel.
- [34] Micro-Vu Corporation. *Machine Vision Systems* [online]. Grand Rapids: Industrial Quick Search, c2018 [cit. 2021-4-19]. Dostupné z: <https://www.machinevisionsystems.net/micro-vu-corporation/>
- [35] *Micro-Vu – 3D optické měřicí přístroje* [online]. Praha: Control Check, 2021 [cit. 2021-5-16]. Dostupné z: <https://www.controlcheck.cz/>
- [36] Micro-Vu. *DEOM* [online]. Praha: Deom, c2021 [cit. 2021-5-6]. Dostupné z: <https://www.deom.cz/znacky/micro-vu.htm>
- [37] SUCHOMEL, Milan. Měřicí přístroje pro přesné měření rozměrů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: MM publishing, c2001 - 2021, 2005 [cit. 2021-5-7]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/merici-pristroje-pro-presne-mereni-rozmeru>
- [38] Micro-Vu EXCEL. *Micro-Vu* [online]. Windsor: Micro-Vu, c2021 [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: <https://www.microvu.com/assets/img/excel.png>
- [39] Micro-Vu VERTEX. *Micro-Vu* [online]. Windsor: Micro-Vu, c2021 [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: <https://www.microvu.com/assets/img/vertex.png>
- [40] Micro-Vu Sol. *3D Metrisoft* [online]. Santiago de Querétaro: 3D Metrisoft, c2021 [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: <https://cmms.mx/wp-content/uploads/2019/09/img01-Micro-Vu-Sol.jpg>

- [41] SOL: Manual Vision System. *3D Metrisoft* [online]. Santiago de Querétaro: 3D Metrisoft, c2021 [cit. 2021-5-1]. Dostupné z: <https://cmms.mx/wp-content/uploads/2019/08/Sol.pdf>
- [42] INSPEC METROLOGY SOFTWARE: FOR AUTOMATED SYSTEMS. Windsor, 2019.
- [43] JELÍNEK, Vít. *Kalibrace skleněných měřitek*. Brno, 2015, 63 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Róbert Jankových.
- [44] Working Glass Scale: 300mm, 0,5mm. *Mitutoyo Česko* [online]. Teplice: Mitutoyo Corporation, c2021 [cit. 2021-5-6]. Dostupné z: [https://shop.mitutoyo.cz/web/mitutoyo/en_CZ/mitutoyo/\\$catalogue/mitutoyoData/PR/182-523-10/datasheet.xhtml](https://shop.mitutoyo.cz/web/mitutoyo/en_CZ/mitutoyo/$catalogue/mitutoyoData/PR/182-523-10/datasheet.xhtml)
- [45] ČSN EN ISO 3650. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Etalony délek – Koncové měřky*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2000, 24 s. Třídící znak 253308.
- [46] BAILEY, Sheryl, Andrew LEWIS, Karalee WHITING a Michael LINGARD. Care and Use of Gauge Blocks. *National Physical Laboratory* [online]. Teddington: NPL Management Limited, c2021 [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <https://eprintspublications.npl.co.uk/7534/1/mgpg149.pdf>
- [47] Koncové měřky. *Unimetra* [online]. Ostrava: UNIMETRA, c2021 [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: http://www.unimetra.cz/soubory_materialy/84_1.pdf
- [48] HAUSNER, Michael. *Optics inspections and tests: A guide for optics inspectors and designers*. Bellingham: Spie Press, 2017. ISBN 9781510601802.
- [49] 5osý odměřovací systém REVO. *Renishaw: apply innovation* [online]. Brno: Renishaw, c2001 - 2021 [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/5osy-odmerovaci-system-revo--10438>
- [50] Optické planparalelní sklíčko: D=60mm, 0,1μm. *Mitutoyo Česko* [online]. Teplice: Mitutoyo Corporation, c2021 [cit. 2021-5-6]. Dostupné z: [https://shop.mitutoyo.cz/web/mitutoyo/cs_CZ/mitutoyo/\\$catalogue/mitutoyoData/PR/158-120/datasheet.xhtml](https://shop.mitutoyo.cz/web/mitutoyo/cs_CZ/mitutoyo/$catalogue/mitutoyoData/PR/158-120/datasheet.xhtml)
- [51] Příslušenství a pomůcky k mikrometrickým měřidlům. *Unimetra* [online]. Ostrava: UNIMETRA, c2021 [cit. 2021-5-6]. Dostupné z: http://www.unimetra.cz/soubory_materialy/47_1.pdf
- [52] MICRO-VU. *INSPEC 2.97.10* [software]. 14.01.2020 [cit. 2021-05-12]. Dostupné z: https://cdn.microvu.com/downloads/InSpec_2.97.10.exe. Požadavky na systém: Win 10; velikost 169 MB.
- [53] PAPAKOVÁ, Markéta. *Využití Chí kvadrát testů na příkladech experimentálních dat s využitím Geostatistical Analyst v softwaru ArcMap*. Olomouc, 2010, 64 s. Dostupné také z: <https://theses.cz/id/v446op/127169-602295379.pdf>. Bakalářská práce. Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta, Katedra geoinformatiky. Vedoucí práce Pavel Tuček.
- [54] CITACE PRO. *Generátor citací* [online]. 2013 [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: <http://citace.lib.vutbr.cz/info>

10 ZOZNAM SKRATIEK, SYMBOLOV, OBRÁZKOV A TABULIEK

10.1 Zoznam tabuliek

Tab. 1 Typické zložky neistoty merania MS[4].....	42
Tab. 2 Stanovenie neistoty merania MS[4].....	45
Tab. 3 Bilancia neistôt[4].....	45
Tab. 4 Technické parametre stroja Micro-Vu Sol 311[35][41]	51
Tab. 5 Charakteristické vlastnosti a rozmery pravítka (upravené podľa [44])	56
Tab. 6 Charakteristické vlastnosti a rozmery koncových mierok[45][47]	58
Tab. 7 vypočítané hodnoty $TQ_{LMN-UMS}$ pri hodnotení po jednotlivých bodoch.....	77

10.2 Zoznam obrázkov

Obr. 1 Konštrukčné typy CMM[13]	32
Obr. 2 Konštrukcia senzoru spracovania obrazu[31]	34
Obr. 3 Postup výpočtu vyrovnávacieho prvku z originálneho obrazu[31]	35
Obr. 4 Určenie ostriaceho bodu pohybom senzoru v rozsahu z_1 a z_2 [31].....	36
Obr. 5 Postup stanovenia vhodnosti meracieho systému podľa VDA 5[4]	44
Obr. 6 Opakované merania na dvoch etalónoch[4]	46
Obr. 7 Opakované merania na troch etalónoch[4]	47
Obr. 8 Meracie stroje od spoločnosti Micro-Vu [38] [39][40]	49
Obr. 9 Micro-Vu Sol 311 s riadiacim PC	50
Obr. 10 Prostredie programu InSpec[52]	52
Obr. 11 Zobrazenia v sekcii odchýlok a nastavenia osvetlenia	53
Obr. 12 Plastická hmota a jej použitie na prichytenie pravítka	56
Obr. 13 Použitie pomocnej rovinnej doštičky.....	59
Obr. 14 Vzor zobrazenia regresnej funkcie	60
Obr. 15 Pravdepodobnostná sieť.....	61
Obr. 16 Normálny pravdepodobnostný graf	61
Obr. 17 Rozbor regresnej funkcie	62
Obr. 18 Vzor vyhodnocovacieho protokolu.....	68
Obr. 19 Súradnicový systém meracieho stroja a schematické nákresy meracích polôh.....	69
Obr. 20 Dĺžka a zameranie krokov na sklenenom pravítku	70
Obr. 21 Charakteristiky meracieho programu[52]	71
Obr. 22 Schematické zobrazenie jednotlivých krokov merania	73
Obr. 23 Tabuľka výsledkov z vyhodnocovacieho protokolu.....	74
Obr. 24 Hodnoty ukazovateľa vhodnosti Q_{MS} v meraných polohách pre $TOL = 0,020$ mm ..	75
Obr. 25 Hodnoty minimálnej tolerancie $TQ_{LMN-UMS}$ v meraných polohách pravítka.....	76
Obr. 26 Rozloženie minimálnych tolerancií v $[\mu m]$	77
Obr. 27 Uloženie koncových mierok na pomocnej sklenenej doštičke	78
Obr. 28 Charakteristiky meracieho programu[52]	79
Obr. 29 Schematické zobrazenie jednotlivých krokov merania	82

10.3 Zoznam skratiek a symbolov

Označenie	Legenda
AIAG	Automotive Industry Action Group (Akčná skupina pre automobilový priemysel, nezisková organizácia)
ANOVA	Analysis of Variance (Analýza rozptylu)
CAD	Computer-aided design, počítačom podporované projektovanie
CCD	Charge-coupled device, zariadenie s viazanými nábojmi
CMM	Súradnicový merací stroj
GPS	Geometrické požiadavky na výrobky
GRR (tiež R&R)	Odhad variability opakovateľnosti a reprodukovateľnosti meracieho systému
GUM	Pokyny pre vyjadrovanie neistoty meraní (zborník) - ISO/IEC Guide 98-3:2008
LED	Light-Emitting Diode (elektroluminiscenčná dioda)
MPE	Limitná hodnota odchýlky merania
MS	Merací systém
MSA	Measurement Systems Analysis (príručka)
Q-DAS®	Dôkaz spôsobilosti meracieho systému (príručka)
SPACE	Study practical with adaptive contemporary equipment
VDA 5	Verband der Automobilindustrie e.V. (Vhodnosť kontrolných procesov)
VIM	International Vocabulary of Metrology (Medzinárodný slovník základných a všeobecných termínov v metrológii)
a	Koeficient regresnej funkcie
b	Koeficient regresnej funkcie
C _g , C _{gk}	Indexy spôsobilosti systému merania
e _{nk}	rezidua, t.j. zvyšky z lineárneho modelu
f _{LIN}	počet stupňov voľnosti, ktorý je pre adekvátnosť modelu (linearita)
f _{EV}	vlastný reziduálny súčet štvorcov (opakovateľnosť na etalóne)

f_{EVR}	Príslušný počet stupňov voľnosti z výpočtu
K	Počet opakovaných meraní
k_{cal}	koeficient rozšírenia
L	Meraný rozmer (v prípade uskutočnených meraní – vzdialenosť)
l	Dĺžka koncovej mierky
l_c	Stredová dĺžka koncovej mierky
MS_{LIN}	stredná kvadratická odchýlka linearity (Lack of Fit Mean Square) MSLF
MS_{EVR}	Stredná kvadratická odchýlka opakovateľnosti (Pure Error Mean Square) MSPE
N	Počet etalónov
Q_{MP}	Ukazovateľ vhodnosti procesu merania
Q_{MS}	Ukazovateľ vhodnosti meracieho systému
Q_{MS_max}	Medzná (limitná) hodnota ukazovateľa vhodnosti meracieho systému
RE	Rozlíšenie meracieho stroja
%RE	Rozlíšenie (Resolution)
Reference	Referenčná hodnota, ktorá sa overuje meraním
SS_{EVR}	Vlastný reziduálny súčet štvorcov
SS_{LIN}	Adekvátnosť modelu (respektíve súčet štvorcov jej odchýlok)
$SS_{RESIDUAL}$	Chyba lineárneho modelu
s_g	Smerodajná odchýlka
TOL	Tolerancia meraného rozmeru
TOL_{MIN_UMS}	Minimálna možná tolerancia meracieho systému
U_{cal}	Rozšírená neistota kalibrácie
U_{MP}	Rozšírená neistota meracieho procesu
U_{MS}	Rozšírená neistota meracieho systému (Expanded measurement uncertainty of MS)
u_{BI}	Zložka neistoty bias (vychýlenia) (Uncertainty from bias) - systematická odchýlka merania

u_{cal}	Neistota kalibrácie (Calibration uncertainty)
u_{EVR}	Zložka neistoty merania z opakovateľnosti (Repeatability on reference standard)
u_{LIN}	Zložka neistoty merania z linearity (Uncertainty from linearity) - odchýlka (chyba) linearity
u_{MS}	Kombinovaná štandardná neistota meracieho systému (Combined standard uncertainty of MS)
u_{MS_REST}	Zvyškové zdroje neistoty meracieho systému
u_{RE}	Zložka neistoty z rozlíšenia stupnice / meradla
x_{ml}	Pravý rozmer v pásme okolo dolnej tolerančnej medze
x_{mu}	Pravý rozmer v pásme okolo hornej tolerančnej medze
y_{nk}	Nameraná hodnota
\bar{y}_{nk}	Stredná hodnota nameraných hodnôt
$\bar{y}_{n\bullet}$	Stredná hodnota opakovaných meraní na etalóne
\hat{y}_n	Pravdepodobná hodnota regresnej funkcie, ktorá odpovedá hodnotám generovaným lineárnym modelom
\hat{y}_{nk}	Hodnoty generované lineárnym modelom

11 ZOZNAM PRÍLOH

Príloha 1 – Vzorový vyhodnocovací protokol v programe MS Excel

(Protokol VZOR.xlsx)

Príloha 2 – Protokoly vyhodnotených skúšok

(Vyhodnotenie na celom rozsahu)

Príloha 3 – Protokoly vyhodnotených skúšok

(Vyhodnotenie po meraných krokoch)

Príloha 4 – Kalibračný list skleneného pravítka

Príloha 5 – Kalibračný list sady koncových mierok

Príloha 6 – Merací program pre meranie v rozsahu osí XY

(pr300_VUT_SOL_meranie 6 krokov.iwp)

Príloha 7 – Merací program pre meranie v rozsahu osi Z

(mierky_3.iwp)